

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

MODELAGEM HIDROLÓGICA APOIADA POR SISTEMA DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS

Gilcimar Pires Cabral Oliveira

UFMG
Belo Horizonte
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

MODELAGEM HIDROLÓGICA APOIADA POR SISTEMA DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS

Gilcimar Pires Cabral Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Donizete Faria
Co-orientador: Dr. Leonardo Mitre Alvim de Castro

UFMG
Belo Horizonte
2015

O48m
2015

Oliveira, Gilcimar Pires Cabral.

Modelagem hidrológica apoiada por sistema de informações geográficas [manuscrito] / Gilcimar Pires Cabral Oliveira. – 2015.

86 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Sergio Donizete Faria.

Coorientador: Leonardo Mitre Alvim de Castro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2015.

Bibliografia: f. 82-86.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Sistemas de informação geográfica – Teses. 3. Hidrologia – Teses. I. Faria, Sergio Donizete. II. Castro, Leonardo Mitre Alvim de. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6

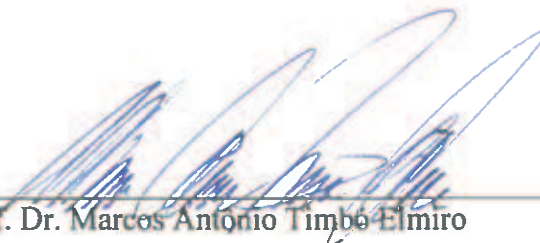
Dissertação defendida e aprovada, em 07 de fevereiro de 2012, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Sérgio Donizete Faria



Dr. Leonardo Mitre Alvim de Castro



Prof. Dr. Marcos Antonio Timbó Elmiro



Profa. Dra. Priscilla Macedo Moura

Dedico este trabalho ao meu avô, Jorge Pires (*in memoriam*), por me mostrar o valor da natureza em nossas vidas da forma mais simples e cativante a ponto de nunca me esquecer disto!

Aos meus pais, Vera e Osmar pelo exemplo e dedicação de toda uma vida para transformar meus sonhos em realidade.

Aos meus irmãos que sempre estiveram comigo e me apoiaram na busca pelo conhecimento.

A Lorena, que todo o tempo me apoiou com especial carinho e atenção acreditando que iria dar certo, além da paciência nos momentos de concentração.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me acompanhar sempre e guiar os passos de minha vida permanecendo comigo em todos os momentos e permitindo que alcance mais uma vitória.

Ao professor Sergio Donizete Faria, pela orientação, ensinamentos, dedicação, amizade e disponibilidade para ajudar sempre que solicitado.

Ao meu co-orientador e amigo Leonardo Mitre, pelos conhecimentos transmitidos, apoio incondicional e pela sabedoria para interceder nos momentos de dificuldade mostrando os caminhos certos a serem seguidos para a conclusão deste trabalho com sucesso.

Ao amigo, José Centeno, que apoiou esta ideia e deu condições para se transformar em realidade e por acreditar em minha capacidade.

Aos colegas de trabalho na Anglo American pelo apoio durante este período de conciliação de tarefas e por compreender minhas ausências.

Aos amigos que me apoiaram em Belo Horizonte durante os períodos de aula. Em especial a Luciana, Júlio, Luciano, Fabiana, Fabrício e Thiago.

Aos meus colegas de turma pelo convívio, companheirismo e momentos vividos neste período do mestrado.

Aos professores do programa de mestrado que com boa vontade e disposição transmitiram o conhecimento em suas aulas ou em conversas extra-classe.

Ao professor Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro e a professora Dra. Priscilla Macedo Moura que me deram a honra de tê-los em minha banca de defesa.

Ao engenheiro João Lopes que gentilmente forneceu o modelo SMAP e se colocou à disposição para qualquer ajuda necessária durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, a todos aqueles que direta ou indiretamente participaram deste trabalho e de minha formação pessoal e profissional: muito obrigado pela colaboração.

RESUMO

A representação dos fenômenos e processos que regem os sistemas naturais tem propiciado o desenvolvimento de modelos que buscam retratar o comportamento desses sistemas. Neste contexto, os modelos hidrológicos auxiliam no entendimento dos processos físicos do ciclo hidrológico nas suas dimensões temporais. Comumente, os dados necessários à modelagem hidrológica têm sido utilizados com base na experiência ou sensibilidade dos analistas ou, ainda, em função de dados de outros estudos. O presente trabalho tem por objetivo discutir o potencial de uso de Sistemas de Informações Geográficas – SIG no tratamento de dados e informações georreferenciadas para obtenção dos parâmetros para modelagem hidrológica, Neste trabalho a modelagem é realizada no *Soil Moisture Accounting Procedure Model* – SMAP. O apoio de um SIG possibilita a obtenção de uma modelagem mais acurada, com bom ajuste entre os valores de vazões calculadas e observadas, avaliado por meio do coeficiente de determinação. A partir dos resultados alcançados com a integração das ferramentas SIG a modelos hidrológicos, a principal conclusão deste trabalho aponta para a eficácia do uso desses sistemas como suporte à estimação dos parâmetros de entrada da modelagem hidrológica, para as duas bacias estudadas.

Palavras-Chave: SIG, modelo hidrológico, modelagem hidrológica.

ABSTRACT

The representation of the phenomena and processes that rule the natural systems has been propitiating opportunities for the development of models that aim showing the behavior of these systems. In this context, the hydrologic models can be highlighted as they aim to understand the physical processes of the hydrologic cycle at its temporal dimension. Frequently, the main data for the hydrologic modeling have been used based in the experience and sensibility of the analysts or hydrologists or, even, based in data from other studies. The present study had the objective to discuss the potential use of Geographic Information Systems – GIS for the processing of data and georeferenced information to obtain the main parameters for the hydrologic modeling. In this work the modeling is performed in Soil Moisture Accounting Procedure Model – SMAP. With the support of the GIS tools, it was possible to obtain an accurate model, with good results between the values of calculated and observed flows, taking to a good determination coefficient. From the obtained results, with the integration of the GIS tools to hydrologic models, the main conclusion of this study relates to the efficacy of the use of these systems as a support for the estimation of entrance parameters for the modeling process, in the case of the studied basins.

Keywords: GIS, hydrological model, hydrological modeling

SUMÁRIO

Pág.		
	LISTA DE FIGURAS	
	LISTA DE TABELAS	
	LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivos.....	16
1.2	Estrutura da dissertação.....	16
2	HIDROLOGIA E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	17
2.1	Ciclo hidrológico.....	17
2.2	Bacia hidrográfica.....	18
2.3	Modelagem de sistemas ambientais.....	20
2.4	Modelagem hidrológica.....	22
2.4.1	Classificação e aplicação de modelos hidrológicos.....	22
2.4.2	Modelos hidrológicos.....	24
2.4.2.1	Modelo Stanford IV.....	25
2.4.2.2	Topmodel.....	25
2.4.2.3	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>	26
2.4.2.4	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias.....	32
2.4.2.5	Modelo Rio Grande.....	34
2.4.3	Dados de entrada dos modelos hidrológicos.....	35
2.5	Sistemas de informações geográficas e modelagem hidrológica.....	36
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	Pré-processamento.....	42
3.1.1	Dados cartográficos e temáticos.....	42
3.1.2	Caracterização da área de estudo.....	42
3.1.3	Análise e compilação dos dados hidrometeorológicos.....	45
3.2	Processamento.....	47
3.2.1	Simulação hidrológica.....	47
3.2.2	Análise de eficiência da modelagem.....	47

3.2.3	Análise de sensibilidade de parâmetros.....	48
3.3	Pós-processamento.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Caracterização das sub-bacias.....	49
4.1.1	Sub-bacia 1.....	49
4.1.2	Sub-bacia 2.....	54
4.2	Análise e compilação dos dados hidrometeorológicos.....	58
4.3	Simulação hidrológica.....	65
4.3.1	Sub-bacia 1.....	65
4.3.2	Sub-bacia 2.....	68
4.4	Análise de eficiência.....	71
4.5	Análise de sensibilidade.....	72
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 – Representação simplificada do ciclo hidrológico e seus elementos	18
Figura 2.2 – Representação, em perspectiva, da bacia hidrográfica de um curso de água.....	19
Figura 2.3 – Discretização de bacias hidrográficas: (a) concentrada; (b) sub-bacia; (b) módulo	23
Figura 2.4 – Discretização da bacia hidrográfica no modelo Stanford IV.....	25
Figura 2.5 – Fluxograma da versão diária do modelo SMAP	27
Figura 2.6 – Método de Thiessen com destaque para área de influência do posto pluviométrico 3	30
Figura 2.7 – Estrutura geral de sistemas de informações geográficas	37
Figura 2.8 – Caracterização da bacia hidrográfica em um SIG.....	39
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia	41
Figura 3.2 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio (sub-bacia do Rio Doce)	43
Figura 3.3 – Mapa de localização da área de estudo nas cabeceiras do rio Santo Antônio: Sub-bacias 1 e 2.....	44
Figura 3.4 – Mapa de localização das estações utilizadas no estudo	46
Figura 4.1 – Mapa hipsométrico da Sub-bacia 1	51
Figura 4.2 – Mapa de uso e ocupação do solo da Sub-bacia 1.....	52
Figura 4.3 – Mapa pedológico da Sub-bacia 1	53
Figura 4.4 – Mapa hipsométrico da Sub-bacia 2	55
Figura 4.5 – Mapa de uso e ocupação do solo da Sub-bacia 2	56
Figura 4.6 – Mapa pedológico da Sub-bacia 2	57
Figura 4.7 – Correlação chuva-vazão na estação 56750000 – 01/09/2004 a 31/08/2005.....	59
Figura 4.8 – Correlação chuva-vazão na estação 56750000 – 01/09/2005 a 31/08/2006.....	60
Figura 4.9 – Correlação chuva-vazão na estação 56750000 – 01/09/2006 a 29/01/2007.....	61
Figura 4.10 – Correlação chuva-vazão na estação 56765000 – 01/09/2004 a 31/08/2005.....	62

Figura 4.11 – Correlação chuva-vazão na estação 56765000 – 01/09/2005 a 31/08/2006.....	63
Figura 4.12 – Correlação chuva-vazão na estação 56765000 – 01/09/2006 a 29/01/2007.....	64
Figura 4.13 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na calibração do modelo para a Sub-bacia 1.....	65
Figura 4.14 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1 na calibração do modelo	66
Figura 4.15 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na validação do modelo para a Sub-bacia 1	68
Figura 4.16 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1 na validação do modelo	68
Figura 4.17 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na calibração do modelo para a Sub-bacia 2	69
Figura 4.18 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 2 na calibração do modelo	69
Figura 4.19 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na validação do modelo para a Sub-bacia 2	71
Figura 4.20 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 2 na validação do modelo..	71
Figura 4.21 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1: acréscimo de 30% em Str (Cenário 3)	74
Figura 4.22 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1: redução de 20% em K2t (Cenário 5)	75
Figura 4.23 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1: Crec igual a média da sua faixa de variação (Cenário 7)	76

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 – Modelos hidrológicos: tipos, estruturas, características e usos	24
Tabela 2.2 – Abstração inicial (A_i)	31
Tabela 2.3 – Capacidade de campo (C_{apac})	31
Tabela 2.4 – Dados espaciais necessários para aplicação do modelo MGB-IPH	34
Tabela 3.1 – Estações fluviométricas selecionadas na área de estudo	45
Tabela 3.2 – Estações pluviométricas selecionadas na área de estudo	45
Tabela 3.3 – Estações climatológicas selecionadas na área de estudo	45
Tabela 4.1 – Área das unidades de uso e ocupação do solo mapeadas na Sub-bacia 1 ..	49
Tabela 4.2 – Área das unidades de uso e ocupação do solo mapeadas na Sub-bacia 2 ..	54
Tabela 4.3 – Relatório de calibração do modelo: Sub-bacia 1	66
Tabela 4.4 – Relatório de calibração do modelo: Sub-bacia 2	69
Tabela 4.5 – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe dos cenários de calibração e validação para a Sub-bacia 1 e a Sub-bacia 2	72
Tabela 4.6 – Limites inferiores e superiores dos parâmetros S_{tr} , K_{2T} e C_{rec} na análise de sensibilidade	73
Tabela 4.7 – Resultados da análise de sensibilidade aos parâmetros S_{tr} , K_{2t} e C_{rec} : Sub-bacia 1	74
Tabela 4.8 – Resultados da análise de sensibilidade aos parâmetros S_{tr} , K_{2t} e C_{rec} : Sub-bacia 2	77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	– Agência Nacional de Águas
CEMIG	– Companhia Energética de Minas Gerais
CETEC	– Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
COPASA	– Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPTEC	– Centro de Previsão do tempo e Estudos Climáticos
CRWR	– <i>Center for Research in Water Resources</i>
DAEESP	– Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
EMBRAPA	– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	– Empresa de Pesquisa Energética
ESRI	– <i>Environmental Systems Research Institute</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGA	– Instituto de Geociências Aplicadas
INMET	– Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPH	– Instituto de Pesquisas Hidráulicas
SIG	– Sistemas de Informações Geográficas
MDE	– Modelo Digital de Elevação
MGB	– Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
PNRH	– Política Nacional de recursos Hídricos
RADAM	– Radar da Amazônia
SAD	– <i>South American Datum</i>
SMAP	– <i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SNGRH	– Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos
SRTM	– <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TOPMODEL	– <i>Topography Based Hydrological Model</i>
UHE	– Usina Hidrelétrica
URH	– Unidade de Resposta Hidrológica
UTM	– Universal Transversa de Mercator

NOTAÇÕES

A_d	– área de drenagem (km ²)
A_i	– abstração inicial (mm)
C_{apac}	– capacidade de campo (%)
C_{rec}	– parâmetro de recarga subterrânea (%)
E_b	– escoamento básico
E_{bin}	– vazão básica inicial (m ³ /s)
E_d	– escoamento direto
E_p	– evapotranspiração potencial
E_r	– evapotranspiração real
E_s	– escoamento superficial
IT	– índice topográfico
K_{2t}	– constante de recessão do escoamento superficial (dias)
K_{kt}	– constante de recessão do escoamento básico (dias)
P	– chuva (precipitação)
P_{cof}	– coeficiente de ajuste da chuva média da bacia
Q_{calc}	– vazão calculada
Q_{obs}	– vazão observada
Q_{est}	– vazão estimada
R^2	– coeficiente de determinação
Rec	– recarga subterrânea
R_{solo}	– reservatório do solo (zona aerada)
R_{sub}	– reservatório subterrâneo (zona saturada)
R_{sup}	– reservatório da superfície da bacia
S_{tr}	– capacidade de saturação do solo (mm)
T_{uin}	– teor de umidade inicial (adimensional)

1 INTRODUÇÃO

A busca pelo entendimento da interação entre os sistemas naturais e a vida no planeta Terra tem ocupado espaços cada vez maiores nos estudos desenvolvidos nas instituições de ensino e pesquisa. Esses sistemas naturais terrestres são caracterizados pelos ciclos produzidos e regulados pela natureza e a representação dos fenômenos e processos que regem sua dinâmica tem demandado e propiciado oportunidades para o desenvolvimento de modelos que auxiliam no melhor entendimento desses sistemas.

Em especial, o entendimento dos sistemas hídricos demandou o desenvolvimento de modelos para representar os processos característicos do ciclo hidrológico, ao longo do tempo: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, percolação, evaporação, evapotranspiração. Esses modelos são denominados modelos hidrológicos.

Os modelos hidrológicos podem ser definidos como representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre, permitindo a simulação de processos físicos nas suas dimensões temporais.

Frente às dificuldades e a complexidade envolvida na utilização de modelos hidrológicos, uma forma mais simplificada e uniforme de bacia hidrográfica tem sido utilizada na implementação de modelos concentrados. Um modelo é classificado como concentrado (*“lumped”*) quando não leva em conta a variabilidade espacial dos fenômenos estudados dentro da área de estudo (TUCCI, 2005). Segundo esse autor a utilização de modelos hidrológicos semi-distribuídos ou distribuídos (*“distributed”*), que representam os processos e simulam o ciclo hidrológico através das relações físicas e conceituais, tem sido a escolha de muitos pesquisadores nos últimos anos, por permitirem a detecção de anomalias locais. No entanto, o uso de modelos distribuídos demanda uma extensa coleção de dados espacialmente distribuídos representando a variedade fisiográfica na bacia hidrográfica, nem sempre disponível.

Nesse contexto, modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm sido ferramentas de apoio para estudos na área de recursos hídricos, evoluindo para uma integração que auxiliam na análise de bacias hidrográficas (MACHADO, 2002).

Com esses avanços, a utilização de modelos do tipo chuva–vazão, em estudos visando o gerenciamento de recursos hídricos, tem contribuído para reflexões sobre aspectos como a concessão e controle do uso e conservação da água, dentre outras finalidades. Dentre esses estudos, podem-se destacar as avaliações de alteração no uso e ocupação do solo e suas interferências nos sistemas hídricos; desenvolvimento de ferramentas de previsão de vazões para a operação de sistemas de recursos hídricos ou alerta contra cheias; identificação de novas fontes de suprimento.

No entanto, com frequência, a obtenção dos parâmetros necessários à modelagem hidrológica tem sido, na maior parte dos casos, com base em experiência ou sensibilidade do analista ou, ainda, em função de dados de outros estudos. Esses aspectos têm levado a modelos que não refletem da melhor forma possível a realidade da bacia hidrográfica para a qual foram gerados. Nesse sentido, justifica-se o presente estudo em função da necessidade de avaliar essas práticas com base na aplicação e análise de um modelo hidrológico com o apoio de um SIG, avaliando os possíveis benefícios do uso conjunto dessas duas ferramentas.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação do potencial de uso de um Sistema de Informações Geográficas no tratamento de dados e informações georreferenciadas para obtenção dos parâmetros para modelagem hidrológica.

Os objetivos específicos são:

- estimativa de parâmetros de entrada da modelagem hidrológica por meio de sistema de informações geográficas para um modelo do tipo concentrado;
- modelagem hidrológica do tipo chuva–vazão para duas sub-bacias do rio Santo Antonio – MG;
- análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no modelo aplicado.

1.2 Estrutura da dissertação

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos incluindo esta introdução. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica abordando o ciclo hidrológico, bacia

hidrográfica, bases científicas da Hidrologia, modelagem de sistemas ambientais, modelos hidrológicos, sistema de informações geográficas e sua integração com os modelos hidrológicos. No terceiro capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados na execução do trabalho. No quarto capítulo são discutidos os resultados das análises feitas sobre as características de cada sub-bacia estudada, bem como a discussão sobre os resultados alcançados na etapa de simulação hidrológica e análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no trabalho. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões, com base nos resultados, e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 HIDROLOGIA E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Nesse capítulo é apresentada uma abordagem conceitual de aspectos relacionados à Hidrologia, Sistema de Informações Geográficas e sua integração com modelos hidrológicos. A revisão realizada tem como objetivo compilar conceitos e definições que embasam as discussões propostas.

2.1 Ciclo hidrológico

A constante mudança do estado físico da água é uma característica do ciclo hidrológico ocorrendo por meio de uma sequência fechada de fenômenos em que a água é transferida da superfície da terra para a atmosfera em forma de vapor e retorna na fase líquida e sólida.

O ciclo hidrológico é um “[...] fenômeno global de circulação fechada da água entre o globo terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre” (SILVEIRA, 2001, p. 35).

A água é transferida dos oceanos e da superfície terrestre para a atmosfera por meio do processo de evaporação, causada pela radiação solar. Por outro lado, a força da gravidade, apoiada pela dinâmica das massas de ar, é responsável pela precipitação, principal fenômeno de transferência de água da atmosfera para o oceano e os continentes. Os outros fenômenos envolvidos na dinâmica do ciclo hidrológico são: interceptação, infiltração, transpiração e escoamento superficial.

Na maioria dos estudos do ciclo hidrológico são observados os fenômenos que ocorrem na superfície terrestre, onde a unidade fundamental de análise é a bacia hidrográfica. Na Figura 2.1 é representado, de forma simplificada, o ciclo hidrológico e seus elementos.

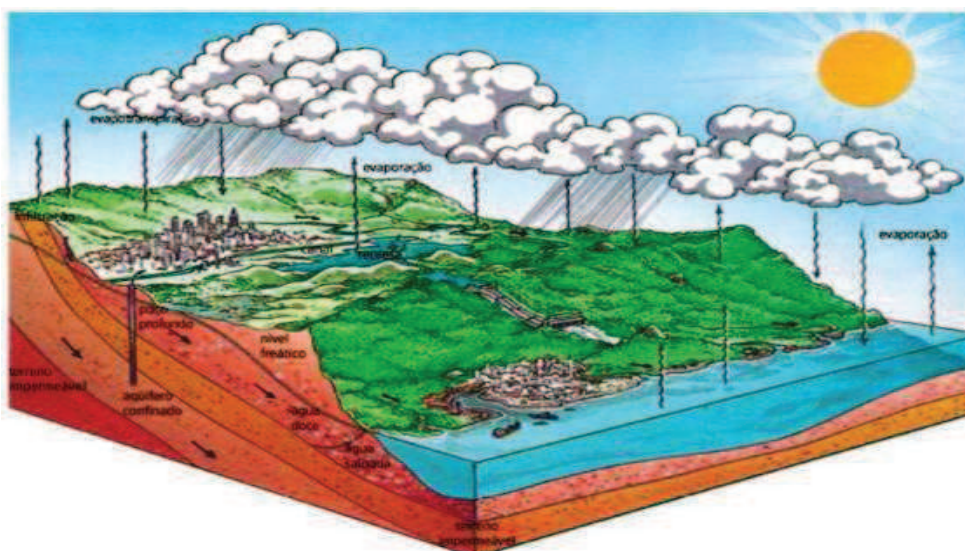


Figura 2.1 – Representação simplificada do ciclo hidrológico e seus elementos.
Fonte: DAEESP (2005).

2.2 Bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo dos modelos hidrológicos e pode ser definida como uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, o exutório.

Para Lima e Zakia (2000) bacias hidrográficas são sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão e, dessa forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico. Segundo esses autores, qualquer modificação no recebimento ou na liberação de energia, ou modificação na forma do sistema, ocorrerá uma mudança compensatória que tende a minimizar o efeito da modificação e restaurar o estado de equilíbrio dinâmico.

De acordo com Yassuda (1993), a bacia hidrográfica é o “palco” unitário de interação das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, econômico e cultural.

De acordo com Christofolletti (1978), Politano (1992) e Pissarra (1998) a bacia hidrográfica tem sido utilizada como uma unidade geomorfológica fundamental para entendimento dos sistemas hídricos, porque suas características governam, no seu interior, todo o fluxo superficial da água. Sendo assim considerada uma unidade territorial ideal para o planejamento integrado do manejo dos recursos naturais.

Na Lei Federal nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos – SNGRH (BRASIL, 1997), a bacia hidrográfica é destacada como a unidade territorial para o planejamento e a implementação dessa política e desse sistema.

Na representação dos sistemas hídricos por meio das técnicas de modelagem de sistemas ambientais, “[...] a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é a precipitação e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando como perdas intermediárias os volumes evaporados, transpirados e também os profundamente infiltrados” (SILVEIRA, 2001, p. 41).

Na Figura 2.2 é apresentada uma representação esquemática da bacia hidrográfica de um curso de água.



Figura 2.2 – Representação, em perspectiva, da bacia hidrográfica de um curso de água.
Fonte: DAEESP (2005).

2.3 Modelagem de sistemas ambientais

Um modelo é uma representação simplificada da realidade, elaborado para auxiliar no entendimento dos processos que envolvem essa realidade.

Para Tucci (2005, p. 17) “[...] o modelo é a representação de algum tipo de objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas”.

Com o passar do tempo, a modelagem foi adquirindo traços específicos que a tornaram um método, uma ferramenta específica para aprimorar o conhecimento. Por isso, hoje em dia, a modelagem pode ser considerada como um instrumento entre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica (CHRISTOFOLETTI, 1999). Em estudos ambientais, os modelos ajudam entender o impacto das mudanças no uso da terra e prever os prováveis impactos decorrentes de intervenções ambientais futuras.

Diferentes maneiras podem ser adotadas para representar os sistemas ambientais e as interações entre suas partes componentes por meio de modelos, não existindo um único modelo que seja melhor e sim aquele que melhor descreve um fenômeno (RENNÓ e SOARES, 2000).

Os modelos são diferenciados pela forma de representar os fenômenos naturais e podem ser classificados também sob diferentes aspectos. Comumente, os modelos são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Com relação ao aspecto temporal, um modelo que faz a representação de um sistema em um determinado momento e somente nele é definido como estático. Por outro lado, um modelo que permite a representação das alterações de estado e comportamento ao longo do tempo nas variáveis do sistema é definido como dinâmico. De acordo com Tucci (2005) um sistema pode se modificar continuamente, mas para efeito de projeto os registros são efetuados em intervalos de tempo (discreto). A escolha do intervalo de

tempo (passo de tempo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração desses resultados (RENNÓ e SOARES, 2000).

Quanto ao aspecto espacial, os modelos podem representar processos e fenômenos sem levar em conta a variação espacial de suas variáveis e parâmetros ou essas variáveis e parâmetros podem ser dependentes da localização no espaço geográfico. No caso dos modelos hidrológicos, o desenvolvimento sob a primeira perspectiva tem como resultado os chamados modelos “concentrados”. Ao passo que os modelos desenvolvidos sobre a segunda perspectiva tem como resultado um modelo denominado “distribuído”. De acordo com Tucci (2005), na prática não existem modelos puramente distribuídos, pois são utilizadas discretizações numéricas, que de alguma forma, tornam o modelo distribuído concentrado, numa pequena subdivisão.

Quanto ao aspecto estrutural, os modelos elaborados com o uso de funções que levam em consideração os processos físicos envolvidos na representação dos fenômenos e processos são chamados de modelos conceituais. Já os modelos ditos “caixa-preta” ou empíricos ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não consideram os processos físicos envolvidos (TUCCI, 2005). Ainda segundo esse autor, os modelos conceituais podem também ser classificados como semi-conceituais e físicos. Os primeiros são caracterizados pela manutenção de algum empirismo nos parâmetros das equações envolvidas e os outros utilizam equações diferenciais do sistema físico, buscando uma maior aproximação da física do sistema representado.

Quanto ao aspecto probabilístico os modelos podem ser considerados como determinísticos ou estocásticos. De acordo com Tucci (2005) se é ignorada a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo e o modelo segue uma lei definida e não a lei das probabilidades, o modelo é dito determinístico. Por outro lado, se o modelo considera a chance de ocorrência das variáveis e o conceito de probabilidade é introduzido, o modelo é chamado estocástico.

Observando as considerações acima apresentadas, técnicas de modelagem têm sido desenvolvidas e aplicadas para avaliar o comportamento dos sistemas ambientais com o intuito de prever as reações do sistema frente a alterações dos cenários naturais. Em específico, os modelos hidrológicos têm facilitado o entendimento e a representação do comportamento da bacia hidrográfica e auxiliado na previsão de cenários futuros ou hipotéticos simulados.

2.4 Modelagem hidrológica

Na busca pelo entendimento dos fenômenos, sua extensão e ocorrência, as bacias hidrográficas têm sido frequentemente representadas por meio de técnicas de modelagem de sistemas ambientais, dando origem aos modelos hidrológicos. Pode-se dizer que a modelagem hidrológica é uma das ferramentas que foi desenvolvida para melhor compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas.

2.4.1 Classificação e aplicação de modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos podem ser classificados quanto a sua estrutura como modelos de comportamento, de otimização ou de planejamento. Segundo Tucci (2005) os modelos hidrológicos de comportamento são utilizados para descrever o comportamento de um sistema; os modelos de otimização buscam as melhores soluções para um projeto específico em nível de projeto; e os modelos de planejamento simulam condições globais de um sistema maior.

Outros aspectos podem ser utilizados para classificar os modelos hidrológicos. Segundo Pinheiro e Naghettini (2010), os modelos hidrológicos podem ser classificados quanto à sua estrutura em empíricos (“caixa-preta”), fisicamente fundamentados, ou conceituais. Os primeiros são aqueles nos quais os valores simulados são ajustados aos dados observados, por meio de funções que não guardam nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. Esses modelos usam, comumente, séries temporais disponíveis para identificar tanto a estrutura do modelo quanto os parâmetros correspondentes, sem que seja necessário nenhum conhecimento *a priori* a respeito do comportamento das bacias

hidrográficas, advindo daí o nome de “caixa-preta” dado a eles (WAGENER *et al.*, 2004). Os modelos fisicamente fundamentados são os que se baseiam nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, sendo os parâmetros aqueles que mais se aproximam das grandezas que governam a física do sistema. E os modelos ditos conceituais são aqueles que relacionam características do processo, embora mantenham razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas (TUCCI, 2005).

Os modelos hidrológicos são classificados também pela discretização dos dados, podendo ser definidos como concentrados (Figura 2.3a); distribuídos por sub-bacias (Figura 2.3b) ou distribuídos por módulos (Figura 2.3c). Nos modelos concentrados toda bacia é representada por uma precipitação média e os processos hidrológicos por variáveis concentradas no espaço. Enquanto isso, os modelos distribuídos por sub-bacias têm a bacia hidrográfica discretizada em sub-bacias de acordo com a drenagem principal. Nos modelos distribuídos por módulos, esta discretização é realizada por formas geométricas sem relação direta com a forma da bacia. De uma forma geral, o modelo concentrado não leva em consideração a distribuição espacial, enquanto nos modelos distribuídos há uma dependência da localização no espaço e/ou no tempo.

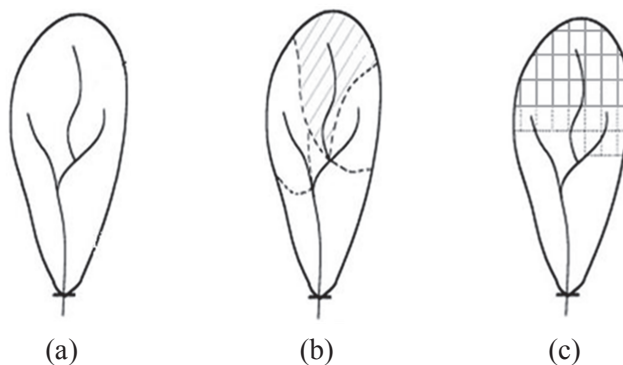


Figura 2.3 – Discretização de bacias hidrográficas: (a) concentrada; (b) sub-bacia; (c) módulo.

Fonte: Adaptada de Tucci (2005).

A escolha do modelo a ser adotado deve levar em consideração os objetivos do estudo proposto, as características da bacia e do rio, a disponibilidade de dados e ainda a familiaridade do usuário com o modelo (TUCCI, 2005). Na Tabela 2.1 são apresentados

diferentes modelos hidrológicos, classificados com base no tipo e estrutura, bem como suas características e principais aplicações de cada grupo.

Tabela 2.1 – Modelos hidrológicos: tipos, estruturas, características e usos.

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
Precipitação-Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual	Comportamento	Calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão em tempo atual; avaliação do uso da terra
Vazão-Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual		Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão de cheia
Geração Estocástica de Vazão	Estocástico		Calcula a vazão com base nas características da série histórica	Dimensionamento do volume de um reservatório
Fluxo Saturado	Determinístico		Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento etc	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático, iteração rio-aquífero etc
Hidrodinâmico	Determinístico		Sintetiza vazões em rios e redes de canais	Simulação de alterações do sistema, efeitos de escoamento de jusante
Qualidade de Água de Rios e Reservatórios	Determinístico		Simula a concentração de parâmetros de qualidade de água	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais
Rede de Canais e Condutos	Determinístico	Comportamento e Otimização	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	Rede abastecimento de água; rede de irrigação
Operação de Reservatórios	Estocástico; Determinístico		Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos
Planejamento e Gestão de Sistemas Múltiplos	Estocástico; Determinístico	Comportamento, Otimização e Planejamento	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial etc

Fonte: Adaptada de Tucci (2005).

2.4.2 Modelos hidrológicos

Nesta seção são apresentados os cinco modelos hidrológicos avaliados neste trabalho, destacando suas principais características quanto à construção, disponibilidade para uso e dados de entrada disponíveis.

2.4.2.1 Modelo Stanford IV

O modelo apresentado por Crawford e Linsley (1996) é composto por dois módulos: módulo de simulação na bacia (*Land*) e módulo de simulação no rio e canal (*Channel*).

O Stanford IV é um modelo determinístico, do tipo chuva-vazão e é classificado como distribuído por sub-bacias, conforme ilustrado na Figura 2.4. Essa distribuição é feita levando em consideração: a existência de um posto fluviométrico, o interesse em obter a vazão de saída no ponto determinado ou ainda as características físicas do trecho ou segmento de rio. Para cada sub-bacia é assumida uma precipitação média.

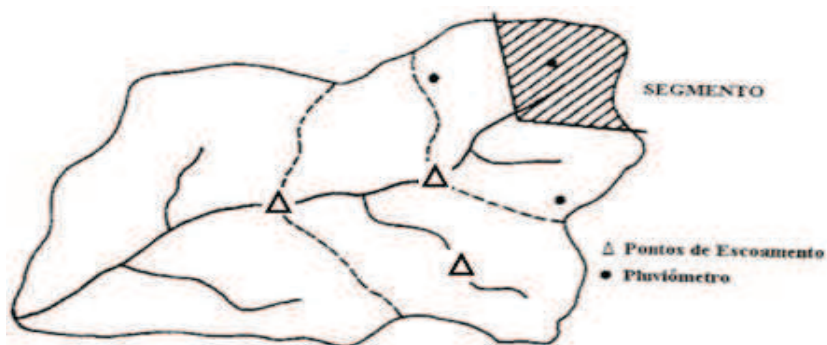


Figura 2.4 – Discretização da bacia hidrográfica no modelo Stanford IV.
Fonte: Tucci (2005).

A versão original do modelo tem uma discretização no tempo de 15 minutos, exigindo, assim, informações sobre a distribuição da precipitação ao longo do dia, o que torna inviável a sua aplicação em bacias onde não existem pluviógrafos ou sua distribuição é irregular dentro da bacia.

2.4.2.2 Topmodel

O Topmodel – *Topography Based Hydrological Model* (BEVEN *et al.*, 1995) é um modelo chuva-vazão do tipo conceitual e semi-distribuído que utiliza em sua formulação relações físicas para representar a bacia hidrográfica e os processos hidrológicos. O modelo é ainda caracterizado como um modelo determinístico e fisicamente fundamentado.

A topografia é considerada pelo modelo utilizando um índice topográfico (IT), o qual visa representar a heterogeneidade da bacia e a estimativa teórica da acumulação de escoamento em qualquer ponto da bacia. Assim, o escoamento horizontal (superficial ou sub-superficial) gerado por cada elemento de área da bacia depende da declividade e da área que contribui para esse elemento. Elementos de área em regiões convergentes da bacia apresentam uma maior predisposição para gerar escoamento. Elementos em regiões de maior declividade contribuem menos para o escoamento (BEVEN *et al.*, 1995).

Citado por Collischonn (2001) como uma referência recorrente no assunto de modelos hidrológicos distribuídos, o Topmodel se baseia na discretização em sub-bacias e tem sua base física determinada a partir de um modelo numérico de terreno (MNT), do qual é extraída a área de drenagem e a declividade local. Ainda segundo esse autor, o modelo é adequado para os problemas na escala de dezenas a centenas de km².

O modelo tem sido aplicado em estudos com diferentes objetivos. Dentre eles pode-se citar o uso do modelo para apoio à determinação de áreas hidrologicamente sensíveis (SIEFERT, 2010) e simulação de vazões (XAVIER, 2007).

2.4.2.3 Soil Moisture Accounting Procedure

O *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), desenvolvido por Lopes *et al.* (1982), é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Esse modelo é do tipo concentrado, conceitual e é baseado em dois reservatórios correspondendo à camada superficial do solo e à camada subterrânea, respectivamente.

Originalmente desenvolvido para o intervalo de tempo diário, duas outras versões foram apresentadas com intervalo de tempo horário e mensal (LOPES, 1999).

Em sua versão diária o modelo é constituído de três reservatórios matemáticos, conforme ilustrado na Figura 2.5.

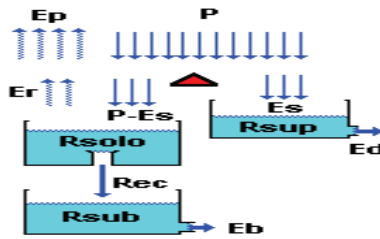


Figura 2.5 – Fluxograma da versão diária do modelo SMAP.
Fonte: Lopes (1999).

As variáveis de estado desse modelo são atualizadas a cada dia da seguinte forma (Equações 2.1 a 2.3):

$$R_{solo}(i + 1) = R_{solo}(i) + P - E_s - E_r - R_{ec} \quad (2.1)$$

$$R_{sup}(i + 1) = R_{sup}(i) + E_s - E_d \quad (2.2)$$

$$R_{sub}(i + 1) = R_{sub}(i) + R_{ec} - E_b \quad (2.3)$$

nas quais: R_{solo} , R_{sup} e R_{sub} correspondem, respectivamente, aos reservatórios do solo (zona aerada), da superfície da bacia e subterrâneo (zona saturada); P é a chuva (precipitação); E_s é o escoamento superficial; E_d é o escoamento direto; E_r é a evapotranspiração real; R_{ec} é a recarga subterrânea; e E_b é o escoamento básico.

O modelo é inicializado conforme as Equações 2.4 a 2.6:

$$R_{solo}(1) = T_{uin} \cdot S_{tr} \quad (2.4)$$

$$R_{sup}(1) = 0 \quad (2.5)$$

$$R_{sub}(1) = (E_{bin}/(1 - K_k))/A_d \cdot 86,4 \quad (2.6)$$

em que: T_{uin} é igual ao teor de umidade inicial (adimensional); E_{bin} é igual a vazão básica inicial (m^3/s); A_d é igual a área de drenagem (km^2); S_{tr} é igual capacidade de saturação do solo (mm); e K_k é a constante de recessão do escoamento básico (dias).

Os processos são representados por cinco funções de transferência: a separação do escoamento superficial é baseada no método do SCS (*Soil Conservation Service of United States Department of Agriculture*).

- Se $(P > A_i)$, então:

$$S = S_{tr} - R_{solo} \quad (2.7)$$

$$E_s = \frac{(P - A_i)^2}{(P - A_i + S)} \quad (2.8)$$

Caso contrário:

$$E_s = 0 \quad (2.9)$$

- Se $((P - E_s) > E_p)$, então:

$$E_r = E_p \quad (2.10)$$

Caso contrário:

$$E_r = (P - E_s) + (E_p - (P - E_s)) \cdot T_u \quad (2.11)$$

- Se $R_{solo} > (C_{apac} \cdot S_{tr})$, então:

$$R_{ec} = C_{rec} \cdot T_u \cdot (R_{solo} \cdot (C_{apac} \cdot S_{tr})) \quad (2.12)$$

Caso contrário:

$$R_{ec} = 0 \quad (2.13)$$

$$E_d = R_{sup} \cdot (1 - K_2) \quad (2.14)$$

$$E_b = R_{sub} \cdot (1 - K_k) \quad (2.15)$$

sendo:

$$T_u = R_{solo} / S_{tr} \quad (2.16)$$

O modelo utiliza seis parâmetros:

S_{tr} - capacidade de saturação do solo (mm);

K_2 - constante de recessão do escoamento superficial (dias);

C_{rec} - parâmetro de recarga subterrânea (%);

A_i - abstração inicial (mm);

C_{apac} - capacidade de campo (%);

K_k - constante de recessão do escoamento básico (dias).

As unidades dos parâmetros são ajustadas da seguinte forma:

$$K_k = 0,5^{(1/K_{kt})} \quad (2.17)$$

e

$$K_2 = 0,5^{(1/K_{2t})} \quad (2.18)$$

sendo que K_k e K_2 são expressos em dias em que a vazão cai a metade de seu valor; C_{rec} e C_{apac} são multiplicados por 100.

O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial. Finalmente, o cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Q = (E_d + E_b) \cdot A_d / 86,4 \quad (2.19)$$

Os dados de entrada do modelo são os totais diários de chuva e o total diário médio do período de evaporação potencial. É utilizado um coeficiente de ajuste da chuva média da bacia (P_{cot}) que deve ser calculado em função da distribuição espacial dos postos.

No modelo SMAP a chuva média é regionalizada para a bacia em função da localização dos postos pluviométricos disponíveis usando o método de Thiessen. O método baseia-se na geometria do plano de localização dos postos para ponderar a influência dos seus dados no cálculo da precipitação média na área (TUCCI, 2005). A metodologia consiste em:

- a) ligar os pontos de localização em planta dos postos;
- b) traçar as linhas perpendiculares na metade do intervalo entre as linhas que ligam os postos;
- c) as linhas perpendiculares e as interseções entre as mesmas delimitam a área de influência de cada posto;
- d) a precipitação média é dada pela média ponderada da área de influência de cada posto pluviométrico em relação à área total da bacia hidrográfica.

Na Figura 2.6 é apresentada uma representação gráfica do método de Thiessen.

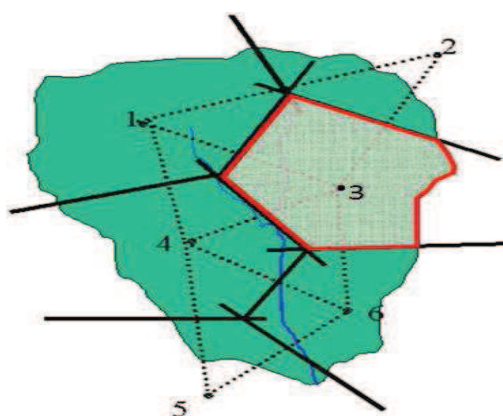


Figura 2.6 – Método de Thiessen com destaque para área de influência do posto pluviométrico 3.
Fonte: Adaptada de Soares (2000).

Dos seis parâmetros do modelo, três são considerados fixos (K_{kt} , A_i e C_{apac}), com estimativas baseadas em processos físicos. O parâmetro K_{kt} , considerado mais estável, corresponde à constante de recessão do escoamento básico. O parâmetro A_i (abstrações iniciais) pode ser obtido através de características da cobertura vegetal (Tabela 2.2) e representa a parcela de precipitação que é captada e retida pela vegetação e é perdida por evaporação sem atingir o solo.

Tabela 2.2 – Abstração inicial (A_i).

Vegetação	A_i (mm)
Campo	2,5
Mata	3,7
Floresta Densa	5,0

Fonte: Lopes (1999).

O parâmetro C_{apac} (capacidade de campo) pode ser obtido a partir de características do tipo de solo (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Capacidade de campo (C_{apac})

Solo	C_{apac} (%)
Arenoso	30
Misto	40
Argiloso	50

Fonte: Lopes (1999).

Os três parâmetros calibráveis do modelo SMAP são: C_{rec} , K_{2t} e S_{tr} . O parâmetro C_{rec} é expresso em valores percentuais e está relacionado ao movimento da água na zona insaturada do solo e, portanto, é função do tipo do solo. O parâmetro K_{2t} é a constante de recessão do escoamento superficial. O parâmetro S_{tr} corresponde à capacidade de saturação do solo, expresso em milímetros, e é uma constante cujo valor é obtido apenas uma vez, no início da simulação.

Na simulação hidrológica o produto obtido é um hidrograma calculado pelo modelo que é comparado com o hidrograma das vazões observadas para a bacia. O objetivo é aproximar o máximo possível os dois hidrogramas. Uma função objetivo busca medir a discrepância entre esses valores. Para a calibração do modelo na versão diária, o SMAP

utiliza a soma dos desvios quadráticos como função objetivo (f.o.), dada pela Equação 2.20:

$$\text{f.o.} = \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{calc})^2 \quad (2.20)$$

na qual Q_{obs} é a vazão observada e Q_{calc} a vazão calculada.

A versão mensal do modelo foi aplicada com o objetivo de estimar a disponibilidade hídrica da bacia do rio Grande, no município de Ubatuba – SP, por Buchianeri (2004). O trabalho desenvolvido pela autora fez uso do modelo SMAP para uma bacia com área de 26 km², obtendo um resultado adequado para os objetivos propostos, ou seja, calibrar e validar a relação chuva–vazão para a referida bacia, além de gerar uma série histórica de vazões e realizar análise temporal da disponibilidade hídrica e demanda para abastecimento público na bacia hidrográfica.

Fadiga Jr *et al.* (2007) obteve resultados satisfatórios na aplicação do modelo SMAP em sua versão diária para a previsão de vazões para a bacia incremental da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

2.4.2.4 Modelo Hidrológico de Grandes Bacias

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e foi descrito por Collischonn (2001) e Collischonn *et al.* (2007). Esse modelo é caracterizado como um modelo distribuído, desenvolvido inicialmente para aplicações em grandes bacias com limitação de dados (maiores que 10.000 km²). Foi inicialmente baseado nos modelos LARSIM (BREMICKER, 1998) e VIC (LIANG *et al.*, 1994; NIJSSEM *et al.*, 1997), com algumas modificações nos módulos de evapotranspiração, percolação e propagação de vazões. Paiva (2009) descreve o MGB-IPH como um modelo baseado em processos e que simula o ciclo hidrológico através das relações físicas e conceituais.

As etapas do ciclo hidrológico terrestre, incluindo balanço de água no solo, evapotranspiração, interceptação, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo e

escoamento na rede de drenagem são simuladas com o intervalo de tempo diário ou menor.

A bacia é discretizada em minibacias e cada uma dessas possui um trecho de rio correspondente. As minibacias são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são áreas de comportamento hidrológico similar, definidas pela combinação de tipos de solo e cobertura vegetal (KOUWEN *et al.*, 1993). Sendo assim, os processos hidrológicos verticais, incluindo interceptação, evapotranspiração, balanço de água no solo, geração de escoamentos superficial e subsuperficial e percolação ao aquífero, são simulados em nível das URH. Os volumes gerados nas URH são somados e propagados em nível de minibacia, sendo posteriormente propagados pela rede de drenagem representando os processos hidrológicos horizontais do sistema.

Os dados hidrometeorológicos para a aplicação do modelo MGB-IPH são:

- séries de dados de vazões de rios em postos fluviométricos;
- séries de dados de precipitação em postos pluviométricos;
- séries de dados de variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, insolação, pressão atmosférica).

As características físicas da bacia, como topografia, tipo e cobertura vegetal do solo são obtidas por meio de imagens de satélite, mapas digitalizados e modelo digital de elevação (MDE). Nessa etapa devem ser coletadas e organizadas as informações necessárias para o pré-processamento de dados, normalmente realizada usando um sistema de informações geográficas (SIG). No caso do modelo MGB-IPH é utilizado um conjunto de ferramentas chamado *ArcHydro Tools*, desenvolvido no Centro de Pesquisas em Recursos Hídricos (CRWR, do inglês *Center for Research in Water Resources*) na Universidade do Texas – Austin – EUA, mantido e distribuído gratuitamente pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), fabricante do *software* ArcGIS.

Os dados que devem fazer parte da base de dados SIG para aplicação do modelo MGB-IPH são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Dados espaciais necessários para aplicação do modelo MGB-IPH.

Dado	Caráter	Tipo	Fonte
Modelo Digital de Elevação	Obrigatório	Raster	SRTM, EMBRAPA
Hidrografia	Opcional	Vetorial (linhas)	ANA
Postos Pluviométricos	Obrigatório	Vetorial (pontos)	ANA
Postos Fluviométricos	Obrigatório	Vetorial (pontos)	ANA
Postos Climatológicos	Obrigatório	Vetorial (pontos)	ANA, INMET
Classes de Vegetação	Obrigatório	Raster	Imagens de satélites,
Tipos de Solos	Obrigatório	Raster	Radam Brasil, CETEC

Collischonn (2006), Ribeiro Neto (2006), Paiva (2009) e Getirana (2009) utilizaram o modelo na previsão de vazões e simulação hidrológica em bacias hidrográficas. As bacias estudadas foram, respectivamente: rio Solimões, rio Negro, rios São Francisco e Tapajós, rio Madeira. O modelo MGB-IPH também foi utilizado para simulações de qualidade d'água, incluindo aspectos de cargas difusas e pontuais e dispersão de poluentes nos corpos d'água, no sistema Taquari-Antas – RS (LARENTIS, 2004).

2.4.2.5 Modelo Rio Grande

O modelo de simulação hidrológica Rio Grande é resultado de um projeto desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, com o apoio financeiro da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Concebido inicialmente para a bacia hidrográfica da Usina Hidrelétrica de Camargos, localizada na cabeceira do rio Grande, no sul do Estado de Minas Gerais, posteriormente o modelo passou por modificações visando torná-lo apropriado a aplicações genéricas e passou a se chamar Sistema Rio Grande.

O modelo é caracterizado espacialmente como semi-distribuído e foi descrito por Naghettini *et al.* (2002) e Queiroga (2003). Segundo Queiroga (2003) o modelo Rio Grande é um modelo do tipo chuva-vazão semi-distribuído que incorpora soluções

atuais de modelagem matemática de processos hidrológicos testadas em diferentes bacias hidrográficas. Ele se divide em três módulos principais: produção, concentração e propagação do escoamento nos cursos d'água.

A etapa de calibração do modelo pode ser realizada manualmente, embora seja requerido um grande esforço operacional. Um complexo modelo de transformação chuva-vazão com 13 parâmetros justifica esse esforço. Dessa forma, o emprego de um algoritmo automatizado para otimização dos parâmetros visa facilitar essa etapa a ser desenvolvida pelo usuário desse modelo.

Chiari *et al.* (2007) aplicaram o Sistema Rio Grande à área incremental entre as UHE Itumbiara e São Simão, em Goiás, com bons resultados. O modelo apresentou um comportamento homogêneo para diferentes períodos e condições hidrológicas.

Vale ressaltar que os modelos hidrológicos chuva-vazão são uma “composição” de algoritmos que tratam vários processos do ciclo hidrológico. Essa composição pode envolver um grande número de parâmetros e variáveis que se interrelacionam. Tem-se buscado cada vez mais a construção de novos modelos que utilizem um menor conjunto de dados de entrada na tentativa de simplificar a representação dos sistemas naturais.

2.4.3 Dados de entrada dos modelos hidrológicos

Os dados de entrada dos modelos hidrológicos podem ser divididos em dois grupos: dados físicos das bacias e dados históricos hidrometeorológicos.

No primeiro grupo estão os planos de informação de tipos de solo, cobertura vegetal e uso do solo, dentre outros. Nesse grupo tem-se também um modelo digital de elevação (MDE), que representa a morfologia do terreno, o qual é utilizado para calcular características da bacia ou dos módulos definidos na discretização como: área, comprimento de rio, declividade e direção de fluxo.

O segundo grupo, dos dados históricos, é composto pelos dados hidrológicos e meteorológicos. Esses são compostos pelas séries históricas de vazões em postos fluviométricos, de dados de precipitação em postos pluviométricos e de dados de

variáveis climáticas como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica.

Instituições governamentais são as principais fontes e fornecedoras de dados cartográficos e hidrometeorológicos das bacias. Para os dados cartográficos e MDE tem-se, dentre outras: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Instituto de Geociências Aplicadas, Minas Gerais – IGA.

Os dados de monitoramento hidrológico são disponibilizados pela Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA. Os dados climatológicos são fornecidos pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC. As informações hidrometeorológicas obtidas por meio do sensoriamento remoto no Brasil são fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, mais especificamente pelo CPTEC.

A eficiência na representação da bacia hidrográfica com o uso de um modelo hidrológico está intimamente ligada à qualidade dos dados envolvidos nos processos de simulação. Uma das grandes dificuldades relacionadas aos modelos, principalmente os distribuídos, é a grande quantidade de dados envolvidos, uma vez que as características naturais das bacias hidrográficas resultam numa grande quantidade de dados a serem transferidos para o modelo hidrológico. Nesse sentido, os sistemas de informações geográficas (SIG) têm sido utilizados para a geração de dados que funcionam como parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos, permitindo assim, através dessa integração, a manipulação de dados espaciais e servindo como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (SANTOS *et al.*, 2006; MENDES FILHO *et al.*, 2007).

2.5 Sistemas de informações geográficas e modelagem hidrológica

A busca pelo entendimento dos fenômenos naturais e sua relação com a área geográfica de ocorrência demanda uma representação da superfície da terra. Para auxiliar no

atendimento dessa demanda têm-se disponível atualmente os sistemas de informações geográficas (SIG), os quais têm sido utilizados como ferramenta de apoio e suporte nas mais diversas áreas de estudo (agricultura, planejamento territorial, recursos minerais, recursos hídricos, entre outras).

De acordo com a literatura sobre esse assunto, um SIG pode ser entendido como um sistema baseado em computador que permite capturar, modelar, armazenar, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados georreferenciados, auxiliando na representação e entendimento dos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre (GOODCHILD, 1993; BONHAM-CARTER, 1994; CÂMARA NETO, 1995; BURROUGH e McDONNEL, 1998; CYSNE, 2004).

A estrutura de um SIG, de uma forma geral, é composta pelos módulos de interface com o usuário, as funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, e o armazenamento e recuperação de dados organizados sob a forma de banco de dados geográficos (CÂMARA NETO, 1995). Na Figura 2.7 é ilustrada essa estrutura.

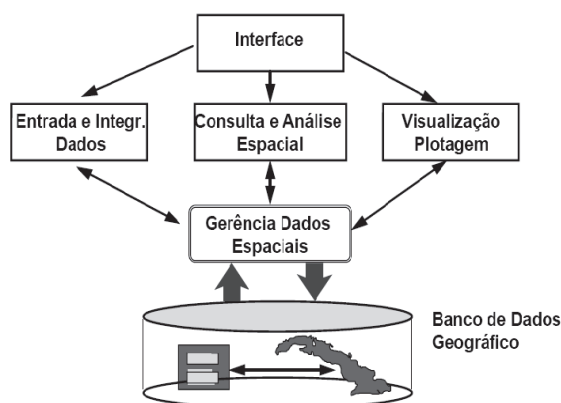


Figura 2.7 – Estrutura geral de sistemas de informações geográficas.
Fonte: Câmara Neto (1995).

Assim, embora pareça um único sistema, um SIG é um conjunto de tecnologias integradas que busca coletar, tratar, visualizar e gerenciar informações georreferenciadas de diversas áreas do conhecimento. Para que essa integração seja possível, a geometria e os atributos dos dados num SIG devem estar georreferenciados e representados numa projeção cartográfica, além de estruturados e armazenados em um banco de dados.

Na hidrologia, a utilização de SIG foi motivada pela necessidade de representações mais acuradas do terreno (SUI e MAGGIO, 1999). Com o avanço da tecnologia de aquisição, representação e processamento de dados, houve também uma extensão do uso de SIG na modelagem hidrológica. Com o uso de um SIG pode-se obter uma descrição espacial detalhada de variáveis da região em estudo vinculadas a modelos hidrológicos distribuídos, contribuindo assim, para se conhecer mais detalhadamente os processos complexos que, quando analisados de forma conjunta, convergem para maior precisão na análise do fenômeno (GOMES e RODRIGUES, 1998).

O uso de um SIG permite subdividir a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas, que através dos resultados georreferenciados contribuem para a caracterização quantitativa dos parâmetros hidrológicos.

A utilização de um SIG possibilita a caracterização espacial e temporal das bacias hidrográficas. Os dados fisiográficos de uma bacia são extraídos por meio de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite. Exemplos desses dados: área, comprimento, declividade e cobertura do solo, que podem ser medidos diretamente ou expressos por índices.

Na Figura 2.8 são mostrados os planos de informação (PI) de um SIG, que caracterizam uma bacia hidrográfica, comumente utilizados como parâmetros de entrada dos modelos hidrológicos.

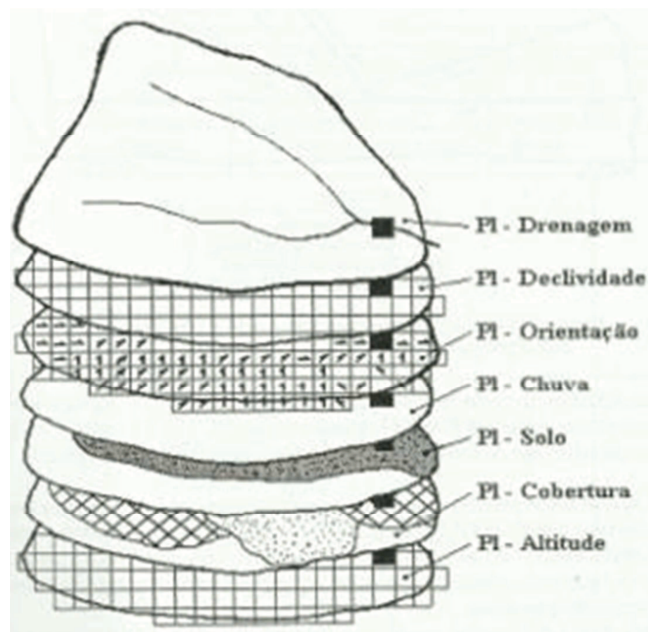


Figura 2.8 – Caracterização da bacia em um SIG.
 Fonte: Tucci (2005).

A integração entre modelos hidrológicos e SIG tem sido apresentada por muitos autores como forma viável de descrever os processos hidrológicos no estudo de bacias hidrográficas. Segundo Calijuri *et al.* (1998) a integração do SIG com os modelos hidrológicos e a sua aplicação em estudos de bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de operações, como projeto, calibração, simulação e comparação entre os modelos, com uma vantagem que é a velocidade de processamento dessas operações.

Para Tsou e Whittemore (2001) o SIG fornece para a modelagem hidrológica uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e apresentar diferentes dados, podendo facilitar a compilação de dados, calibração do modelo e visualização dos parâmetros resultantes, contribuindo, assim, para a geração de informações para a tomada de decisão.

A integração de modelos aos SIG pode ser classificada em dois tipos: integração por meio de uma interface de transferência de dados entre o modelo e o SIG ou a integração das equações do modelo ao SIG (TSOU e WHITTEMORE, 2001). Na primeira forma de integração, o SIG é utilizado nas etapas de pré e pós-processamento: os arquivos de

entrada dos modelos hidrológicos gerados no SIG são convertidos para o formato a ser utilizado no modelo hidrológico; os arquivos de saída do modelo são transferidos para planos de informação do SIG onde os resultados são apresentados. A segunda forma é caracterizada pela customização através do código fonte onde é feita a integração das equações do modelo aos componentes do SIG.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos metodológicos aplicados na pesquisa, divididos em três etapas: pré-processamento (preparação dos dados); processamento (modelagem hidrológica); pós-processamento (interpretação dos resultados e conclusões). O fluxograma da Figura 3.1 mostra de forma esquemática essas etapas conjuntamente.

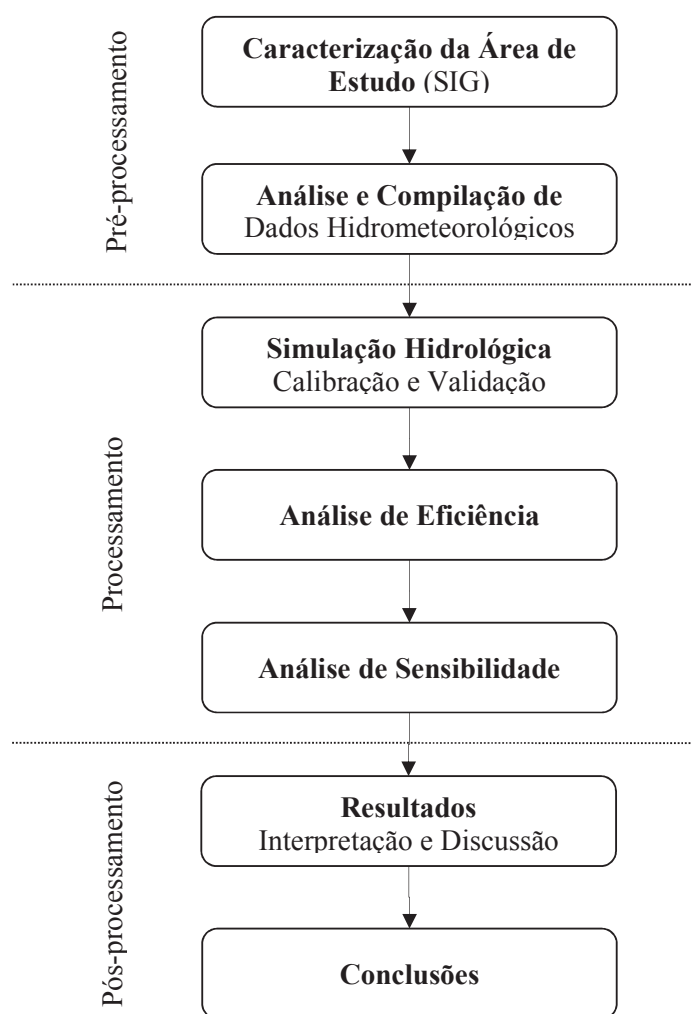


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia.

3.1 Pré-processamento

3.1.1 Dados cartográficos e temáticos

Uma base de dados geográficos foi preparada para auxiliar na caracterização da área de estudo (usando o *software* ArcGIS– versão 9.3.1):

- Modelo digital de terreno: gerado a partir das curvas de nível com equidistância de 20 metros e pontos cotados constantes na Carta do Brasil – escala 1:100.000 – IBGE, folhas Serro SE-23-Z-B-IV (IBGE, 1978), Rio Vermelho SE-23-Z-B-I (IBGE, 1977) e Presidente Kubitscheck SE-23-Z-A-VI (IBGE, 1977);
- Hidrografia: vetorização da hidrografia mapeada e constante na Carta do Brasil – escala 1:100.000 – IBGE, folhas Serro SE-23-Z-B-IV (IBGE, 1978), Rio Vermelho SE-23-Z-B-I (IBGE, 1977), e Presidente Kubitscheck SE-23-Z-A-VI (IBGE, 1977);
- Uso e ocupação do solo: mapeamento de uso e ocupação do solo constante na Avaliação Ambiental Integrada dos Aproveitamentos Hidrelétricos da Bacia do Rio Doce (EPE, 2007). As tipologias estão classificadas como de uso antrópico, representada pelas classes área urbana e pastagem, e como tipologias de cobertura natural, representada pelas classes afloramento rochoso, floresta estacional e savana (cerrado). O mapeamento de uso do solo apresentado foi realizado por interpretação de imagens de satélite de 2002;
- Pedologia (tipos de solos): a base de pedologia utilizada foi produzida pelo IBGE como parte do projeto de sistematização das informações sobre recursos naturais – escala 1:250.000 e publicado na escala 1:1.000.000;
- Climatologia: os dados climatológicos se baseiam na classificação proposta por Nimer (1979) e no mapa divulgado pelo IBGE (2009).

3.1.2 Caracterização da área de estudo

O rio Santo Antônio nasce nos contrafortes da serra do Espinhaço em altitudes da ordem de 1.200 m, no município de Conceição do Mato Dentro (Figura 3.2). Das nascentes,

onde recebe a denominação de ribeirão Santo Antônio do Cruzeiro, até sua foz, que ocorre na divisa dos municípios de Naque e Belo Oriente, pela margem esquerda do rio Doce e em altitudes da ordem de 200 m, percorre cerca de 280 km. Parte desse trajeto, que abrange o trecho das nascentes até a confluência com o rio do Peixe, é feito no sentido geral Noroeste-Sudeste e o restante na direção geral Oeste-Leste. Somente a partir da confluência com o rio Parauninha, que ocorre próximo à área urbana do município de Conceição do Mato Dentro e cerca de 50 km a jusante de suas nascentes, o referido curso de água recebe a denominação de rio Santo Antônio. Ao longo de seu percurso, o rio Santo Antônio recebe como principais afluentes, de montante para jusante e pela margem direita os rios Preto do Itambé e do Tanque. Pela margem esquerda contribuem os rios do Peixe e Guanhões.

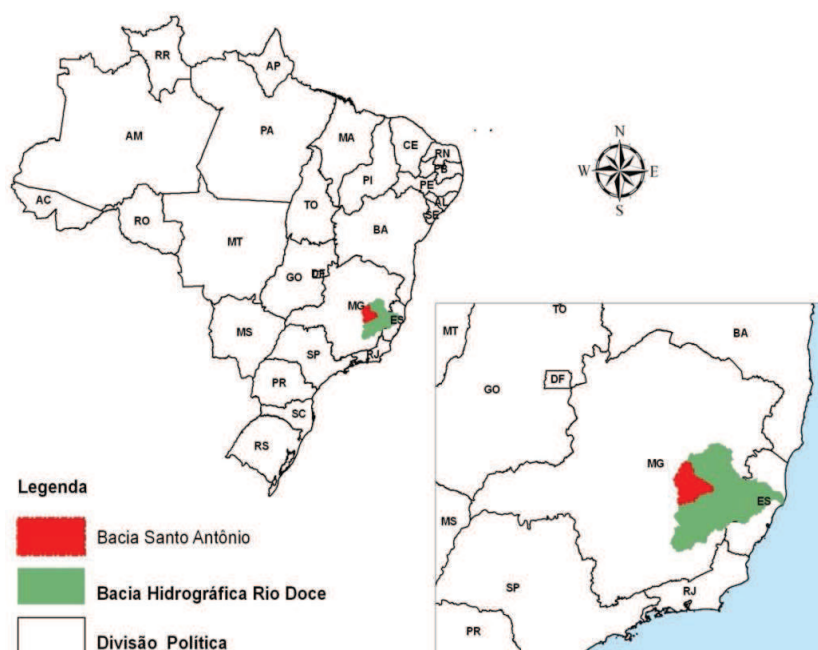


Figura 3.2 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio (sub-bacia do Rio Doce).

De maneira geral, o padrão de drenagem presente na bacia é do tipo dendrítico, ou seja, os ramos formados pelas correntes tributárias distribuem-se em todas as direções sobre a superfície do terreno e se unem formando ângulos agudos de gradações variadas. Em

macro-escala e em alguns trechos da bacia que apresentam declividades acentuadas observa-se o padrão de drenagem paralelo.

Para a bacia do rio Santo Antônio, tem-se os índices de precipitação total média anual variando entre 1.600 mm nas cabeceiras da bacia, 1.500 a 1.400 mm no trecho médio e 1.300 mm na região da foz.

Foram escolhidas duas sub-bacias do rio Santo Antônio (Figura 3.3) para modelagem hidrológica: a primeira, denominada neste estudo como Sub-bacia 1, com 301 km² de área de drenagem; e a segunda, denominada como Sub-bacia 2, com 972 km².

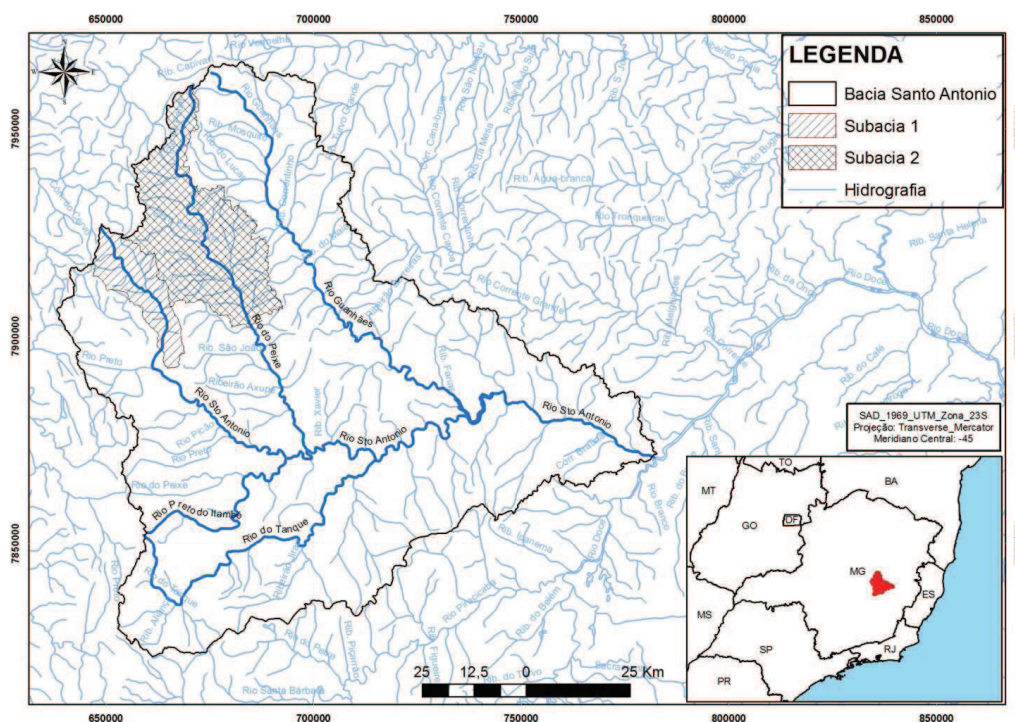


Figura 3.3 – Mapa de localização da área de estudo nas cabeceiras do rio Santo Antônio: Sub-bacias 1 e 2.

Segundo Collischonn (2001), a aplicação dos estudos de modelagem hidrológica pode ocorrer em pequenas bacias, de apenas alguns hectares, em bacias intermediárias com áreas de contribuição aproximada de 300 km², em bacias médias de até 2.000 km² e em grandes bacias com áreas superiores. Portanto, de acordo com essa classificação, as

bacias hidrográficas escolhidas para este trabalho podem ser classificadas como intermediária e média, respectivamente.

3.1.3 Análise e compilação dos dados hidrometeorológicos

O uso de modelos hidrológicos envolve a análise dos dados utilizados, uma vez que nenhum modelo pode gerar informações de qualidade se os dados de entrada forem deficientes.

Para o presente trabalho foram selecionados os dados históricos diários de precipitação, vazão e evaporação para servirem de entrada do modelo, das estações fluviométricas, pluviométricas e climatológicas apresentadas nas Tabelas 3.1 a 3.3, respectivamente. Para complemento dos dados climatológicos foram adquiridos junto ao INMET os dados de evaporação das duas estações selecionadas, do período de 1980 a agosto de 2011.

Tabela 3.1 – Estações fluviométricas selecionadas na área de estudo.

Código	Responsável	Estação	Curso de Água	Localização		Área de Drenagem (km ²)	Período de Dados
				Latitude	Longitude		
5675000	ANA	Conceição do Mato Dentro	Rio Santo Antônio	-19°00'52'' S	-43°26'46'' W	301	3/1945 a 12/2008
5676500	ANA	Dom Joaquim	Rio do Peixe	-18°57'38'' S	-43°14'35'' W	972	6/1946 a 12/2008

Tabela 3.2 – Estações pluviométricas selecionadas na área de estudo.

Código	Responsável	Estação	Município	Localização		Altitude (m)	Período de Dados	Precipitação Total Média Anual (mm)*	Dias de Chuva
				Latitude	Longitude				
1843001	ANA	Serro	Serro	18°36'00'' S	-43°23'00'' W	940	10/1941 a 9/1962	1564,1	121
1843011	ANA	Serro	Serro	18°35'34'' S	-43°24'45'' W	940	1/1984 a 12/2008	1320,8	115
1943002	ANA	Conceição do Mato Dentro	Conceição do Mato Dentro	19°01'00'' S	-43°26'39'' W	675	01/1941 a 12/2008	1554,8	119

Tabela 3.3 – Estações climatológicas selecionadas na área de estudo.

Código	Nome	Localização		Município	Altitude (m)	Período de Dados
		Latitude	Longitude			
83589	Conceição do Mato Dentro	-19°02'00'' S	-43°26'00'' W	Conceição do Mato Dentro	652	1971 a 1990

Na Figura 3.4 é mostrada a localização geográfica das estações selecionadas em relação à área de estudo.

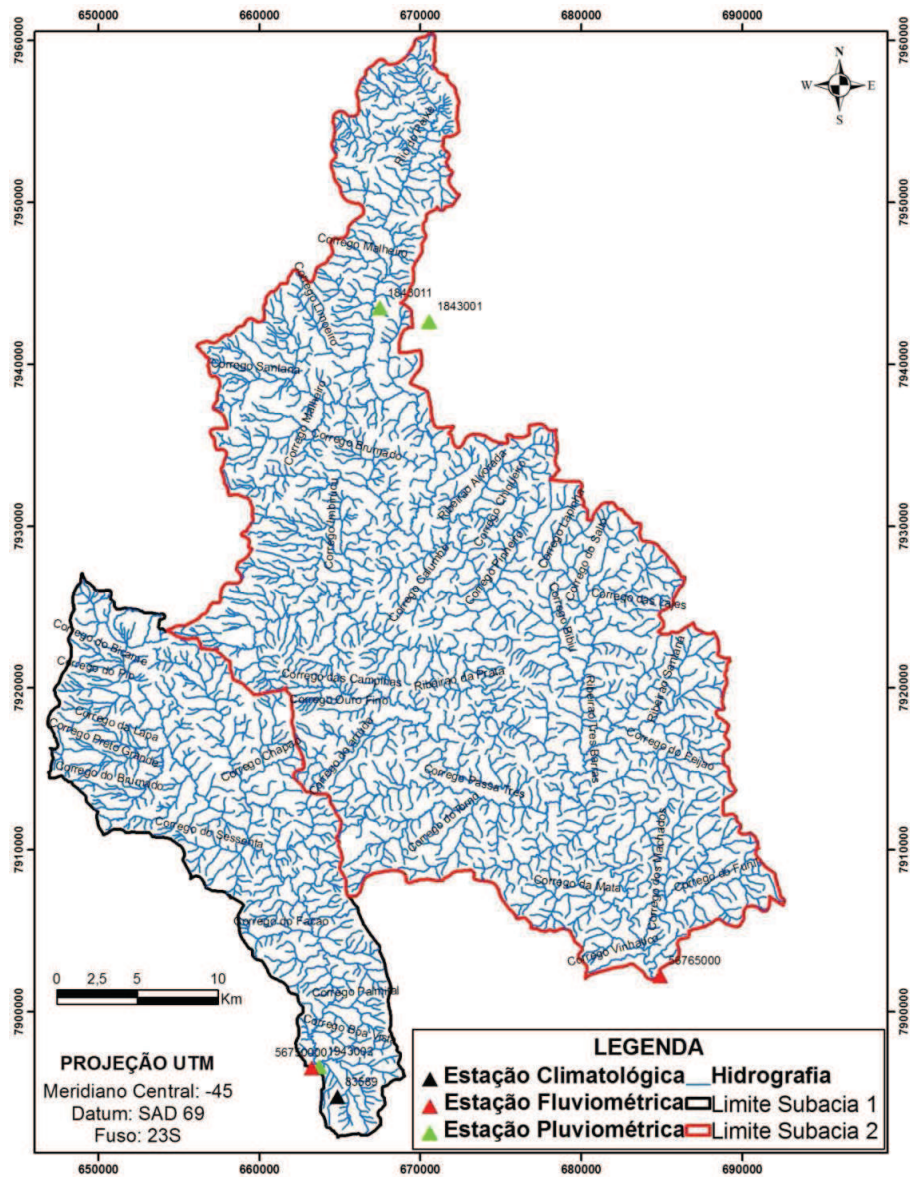


Figura 3.4 – Mapa de localização das estações utilizadas no estudo.

3.2 Processamento

3.2.1 Simulação hidrológica

Para simulação hidrológica de transformação de chuva-vazão nas sub-bacias do rio Santo Antônio foi utilizada a versão diária do modelo SMAP, apresentado no Capítulo 2 – Seção 2.4.2.3. A disponibilidade da implementação desse modelo, somado à disponibilidade dos dados necessários, direcionou a escolha do modelo a ser utilizado.

Para a calibração do modelo (etapa de definição dos parâmetros de entrada da modelagem hidrológica) é utilizado um SIG para obtenção das características físicas da bacia hidrográfica.

Após a etapa de calibração do modelo, uma etapa de validação foi realizada utilizando outro conjunto de dados históricos a fim de validar os parâmetros encontrados na etapa de calibração.

3.2.2 Análise de eficiência da modelagem

A análise da eficiência dos modelos hidrológicos pode ser realizada utilizando-se diferentes métodos estatísticos. No presente trabalho, após a análise do resultado dos cenários de modelagem por meio do coeficiente de correlação, é proposta uma avaliação desses cenários por meio do Coeficiente Eficiência de Nash-Sutcliffe (COLLISCHONN, 2001; MACHADO et al., 2003; MONTE-MOR, 2012).

Com o objetivo de testar o desempenho do modelo, é realizada a análise por meio do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe que, segundo Machado et al. (2003), é um dos critérios estatísticos para avaliar a precisão dos modelos hidrológicos. O coeficiente é dado pela Equação 4.1, na qual Q_{obs} corresponde à vazão ou deflúvio observado, Q_{est} se refere à vazão ou deflúvio estimado e \bar{Q}_{obs} à vazão ou deflúvio observado médio.

$$E = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4.1)$$

O coeficiente E pode variar de infinito negativo até 1, sendo 1 referente ao ajuste perfeito. O valor de E é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, razão

por que, quando E é próximo de 1, o modelo está obtendo bom ajuste para as cheias. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de E supera 0,75, e é considerado aceitável se o valor de E fica entre 0,36 e 0,75 (COLLISCHONN, 2001).

3.2.3 Análise de sensibilidade de parâmetros

A análise de sensibilidade é uma etapa para o entendimento da influência de cada um dos parâmetros de entrada do modelo com os resultados alcançados na modelagem hidrológica realizada. Permite também verificar se um modelo produz resultados lógicos em função de alterações nos parâmetros de entrada.

Para realização do estudo de sensibilidade, os parâmetros sujeitos a variação são aqueles parâmetros calibráveis no modelo SMAP: C_{rec} , K_{2t} e S_{tr} . Um parâmetro é alterado e os demais são mantidos com o objetivo de mensurar a importância individual dos parâmetros sobre o resultado final do modelo.

Os resultados desses estudos fornecem informações sobre o comportamento do modelo e, também, sobre falhas na metodologia utilizada no desenvolvimento do modelo e na sua aplicabilidade a diferentes cenários e escalas.

3.3 Pós-processamento

Após a fase de processamento que compreende as etapas de simulação hidrológica e análise de sensibilidade, os resultados alcançados são interpretados e descritos. Os resultados de todas as etapas do trabalho são avaliados e discutidos em relação à justificativa principal deste estudo, que trata da avaliação do apoio de ferramentas SIG para a modelagem hidrológica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados: da análise e caracterização das duas sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Santo Antonio, denominadas Sub-bacia 1 e Sub-bacia 2 (descritas no Capítulo 3 – Seção 3.1.2 – Figura 3.3); da análise e compilação das séries históricas de dados hidrometeorológicos; da simulação hidrológica utilizando o modelo hidrológico SMAP; da análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada desse modelo hidrológico.

4.1 Caracterização das sub-bacias

4.1.1 Sub-bacia 1

A Sub-bacia 1 tem seu ponto exutório no ribeirão Santo Antônio, situado nas coordenadas UTM–SAD69 – Fuso 23: 663.426 mE e 7.896.663 mN, onde está localizada a estação fluviométrica 5675000 (Tabela 3.1). A área total de contribuição é de 301 km² e ao longo do seu percurso de 50 km o ribeirão Santo Antônio ou Santo Antônio do Cruzeiro recebe diversos pequenos afluentes, os quais constituem um sistema de drenagem dendrítico. As altitudes na área variam entre 610 e 1.330 m (Figura 4.1).

Na Tabela 4.1 são apresentadas as áreas das unidades de uso e ocupação do solo mapeadas na Sub-bacia 1 e mostradas na Figura 4.2.

Tabela 4.1 – Áreas das unidades de uso e ocupação do solo mapeadas na Sub-bacia 1.

Classe	Tipologia	Área	
		(km ²)	(%)
Uso Antrópico	Área Urbana	0,36	0,1
	Pastagem	65,89	21,9
	Subtotal	66,25	22,0
Cobertura Natural	Afloramento Rochoso	43,11	14,3
	Floresta Estacional	115,64	38,4
	Cerrado (Savana)	76,00	25,3
	Subtotal	234,75	78,0
TOTAL		301,00	100,0

Quanto à pedologia, mostrada na Figura 4.3, na Sub-bacia 1 ocorrem dois tipos de solo: Latossolo Vermelho-Escuro (162,6 km², 54,0% da área total); e Litossolo (138,4 km², 46,0% da área total). Os Latossolos Vermelhos geralmente ocorrem sobre rochas do embasamento cristalino, sendo normalmente solos altamente permeáveis e profundos. A cor avermelhada é devida à presença de óxidos de ferro. Os Litossolos por sua vez são solos rasos, rochosos, colocados imediatamente sobre a rocha, não apresentando, portanto, horizontes pedológicos diferenciados.

A região da Sub-bacia 1, banhada principalmente pelo ribeirão Santo Antônio, sofre influência do clima tropical subquente semi-úmido e a precipitação total média anual é da ordem de 1.580 mm.

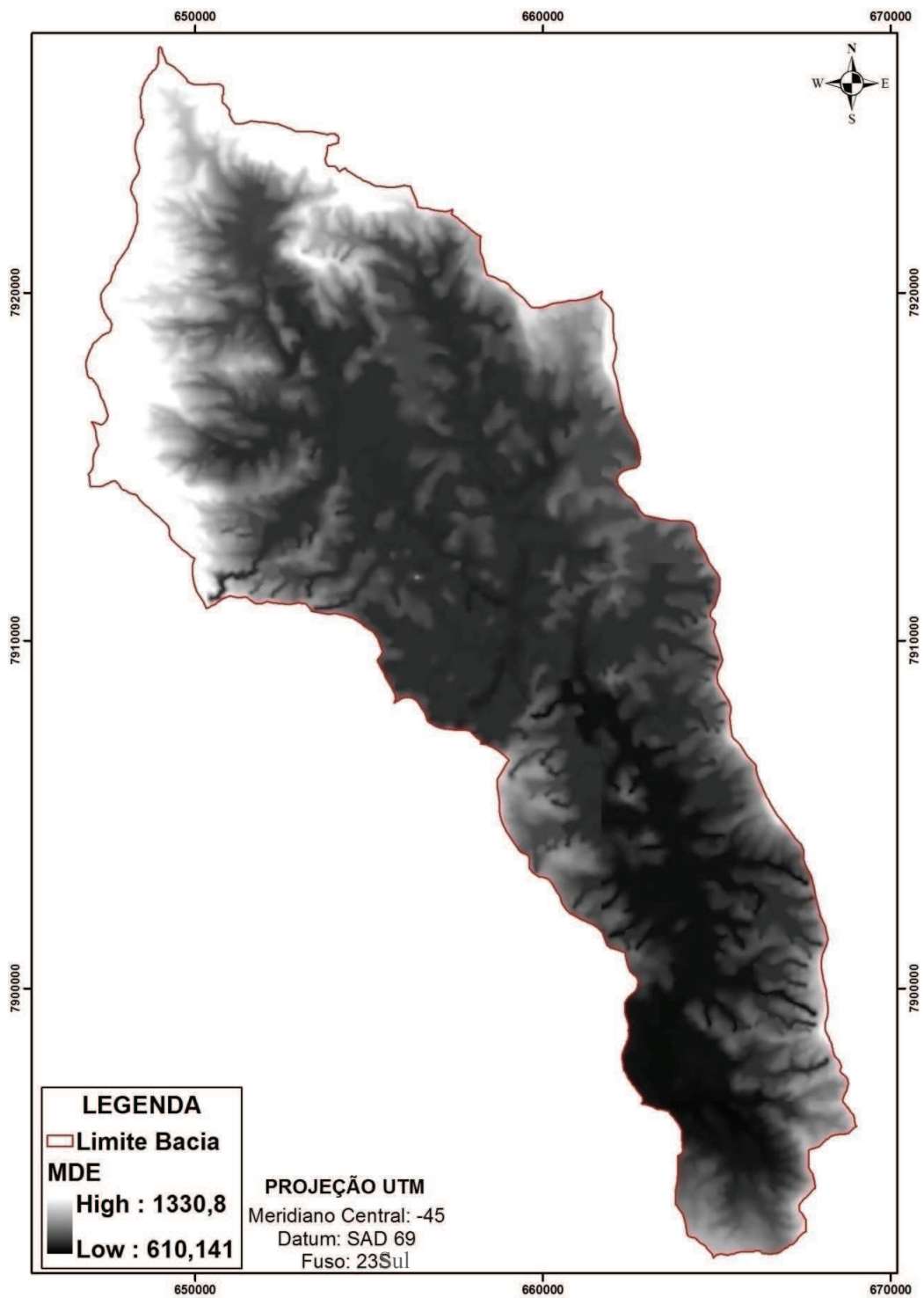


Figura 4.1 – Mapa hipsométrico da Sub-bacia 1.

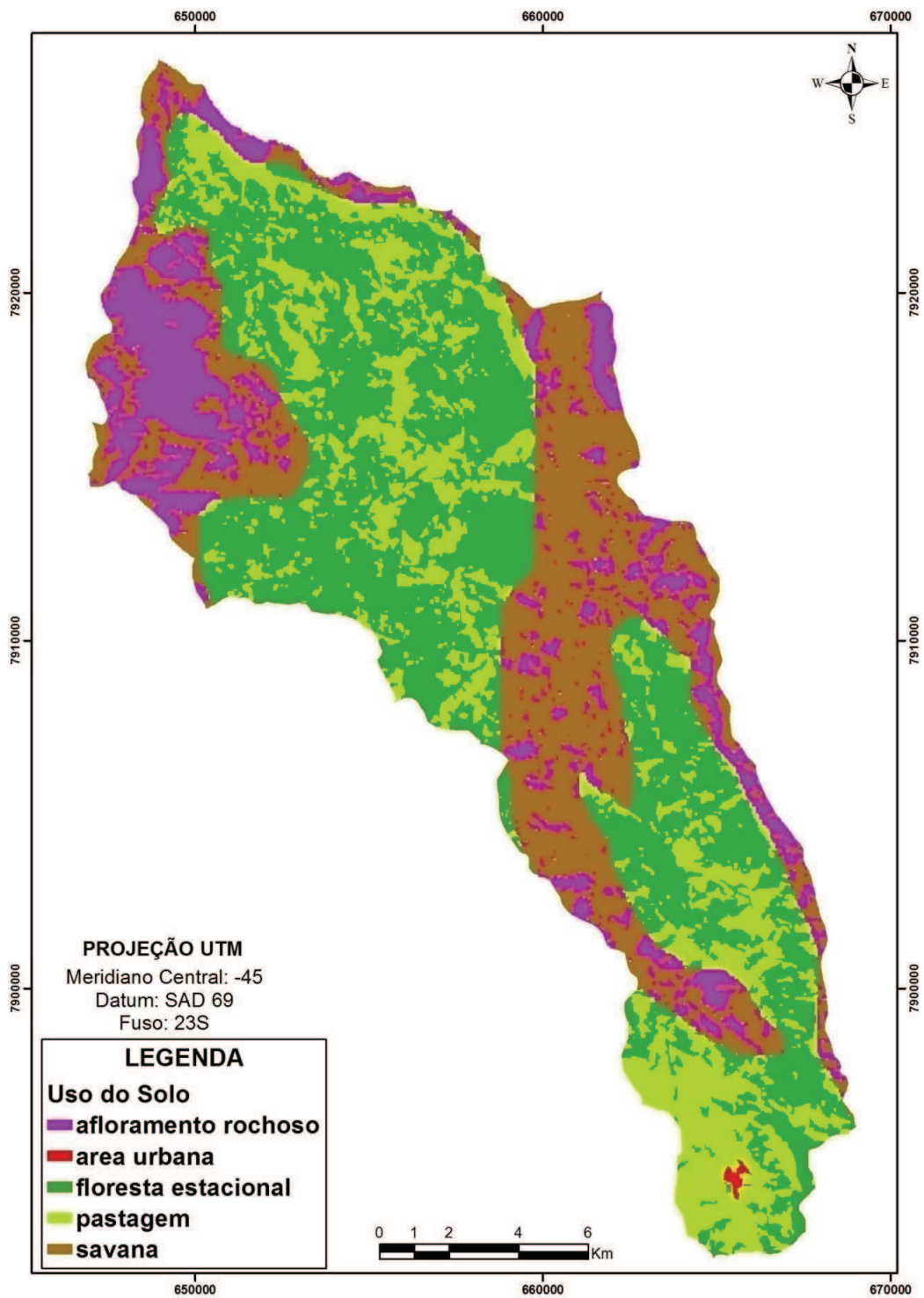


Figura 4.2 – Mapa de uso e ocupação do solo da Sub-bacia 1.

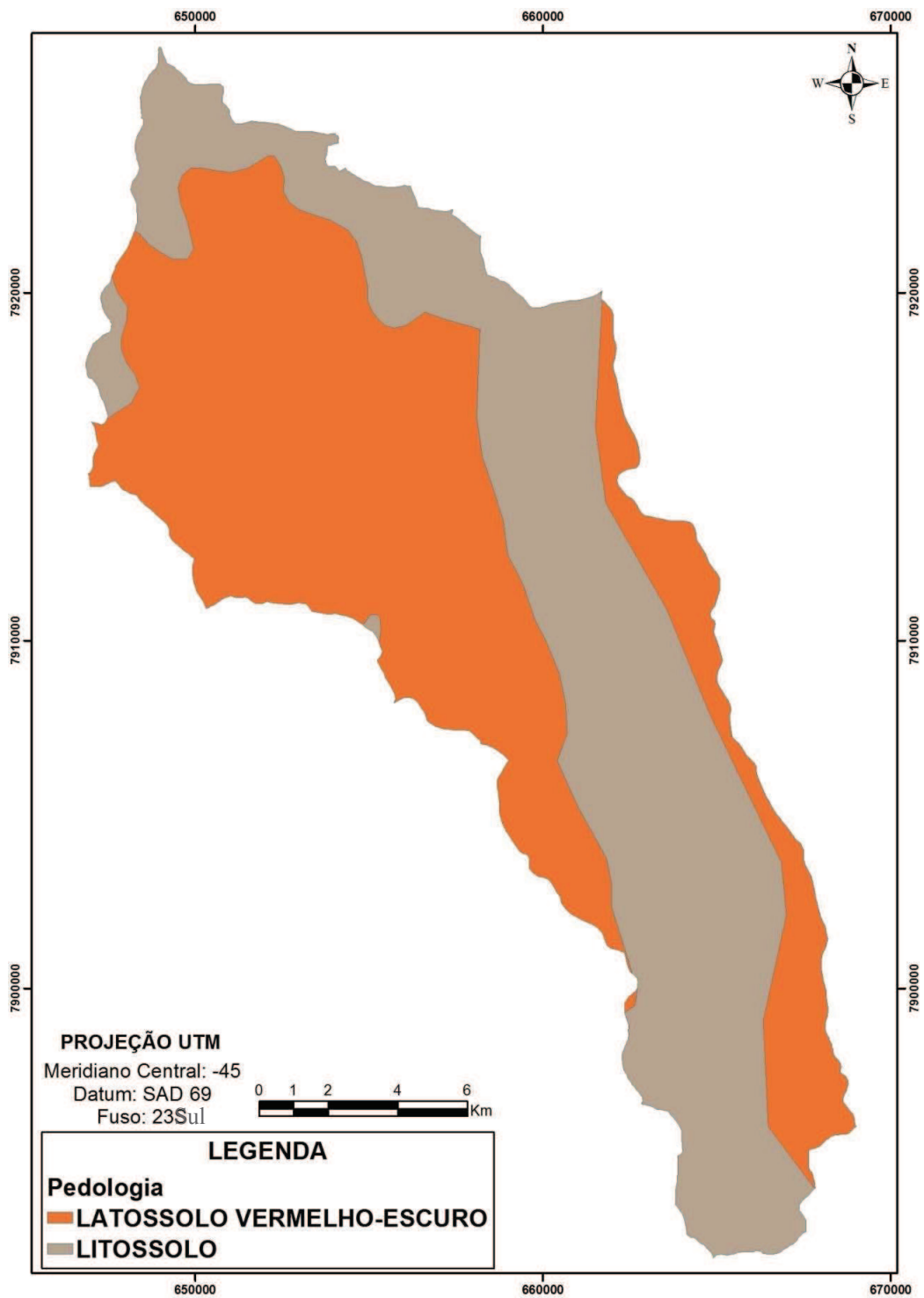


Figura 4.3 – Mapa pedológico da Sub-bacia 1.

4.1.2 Sub-bacia 2

A Sub-bacia 2 tem seu ponto exutório no rio do Peixe, situado nas coordenadas UTM–SAD69 – Fuso 23: 684.931 mE e 7.902.206 mN, onde está localizada a estação fluviométrica 56765000 (Tabela 3.1). A área total de contribuição é de 972 km² e ao longo do seu percurso de 100,3 km o rio do Peixe recebe diversos pequenos afluentes, os quais constituem um sistema de drenagem dendrítico. As altitudes na área variam entre 523 e 1.535 metros (Figura 4.4).

Na Tabela 4.2 são apresentadas as áreas das unidades de uso e ocupação do solo mapeadas na Sub-bacia 2 e mostradas na Figura 4.5.

Tabela 4.2 – Áreas das unidades de uso e ocupação do solo mapeadas na Sub-bacia 2.

Classe	Tipologia	Área	
		(km ²)	(%)
Uso Antrópico	Área Urbana	0,09	0,1
	Pastagem	259,83	26,7
	Subtotal	259,92	26,8
Cobertura Natural	Afloramento Rochoso	70,53	7,3
	Floresta Estacional	513,06	52,7
	Cerrado (Savana)	128,49	13,2
	Subtotal	712,08	73,2
TOTAL		972,00	100,0

Quanto à pedologia, mostrada na Figura 4.6, na Sub-bacia 2 ocorrem quatro tipos de solo: Latossolo Vermelho-Escuro (430,1 km²; 44,2% da área total); Latossolo Vermelho-Amarelo (300,2 km²; 30,9% da área total); Litossolo (127,1 km²; 13,1% da área total); e Cambissolo (114,6 km²; 11,8% da área total).

Nessa região, banhada principalmente pelo rio do Peixe e sob influência do clima tropical subquente semi-úmido, a precipitação total média anual varia em torno de 1.540 mm.

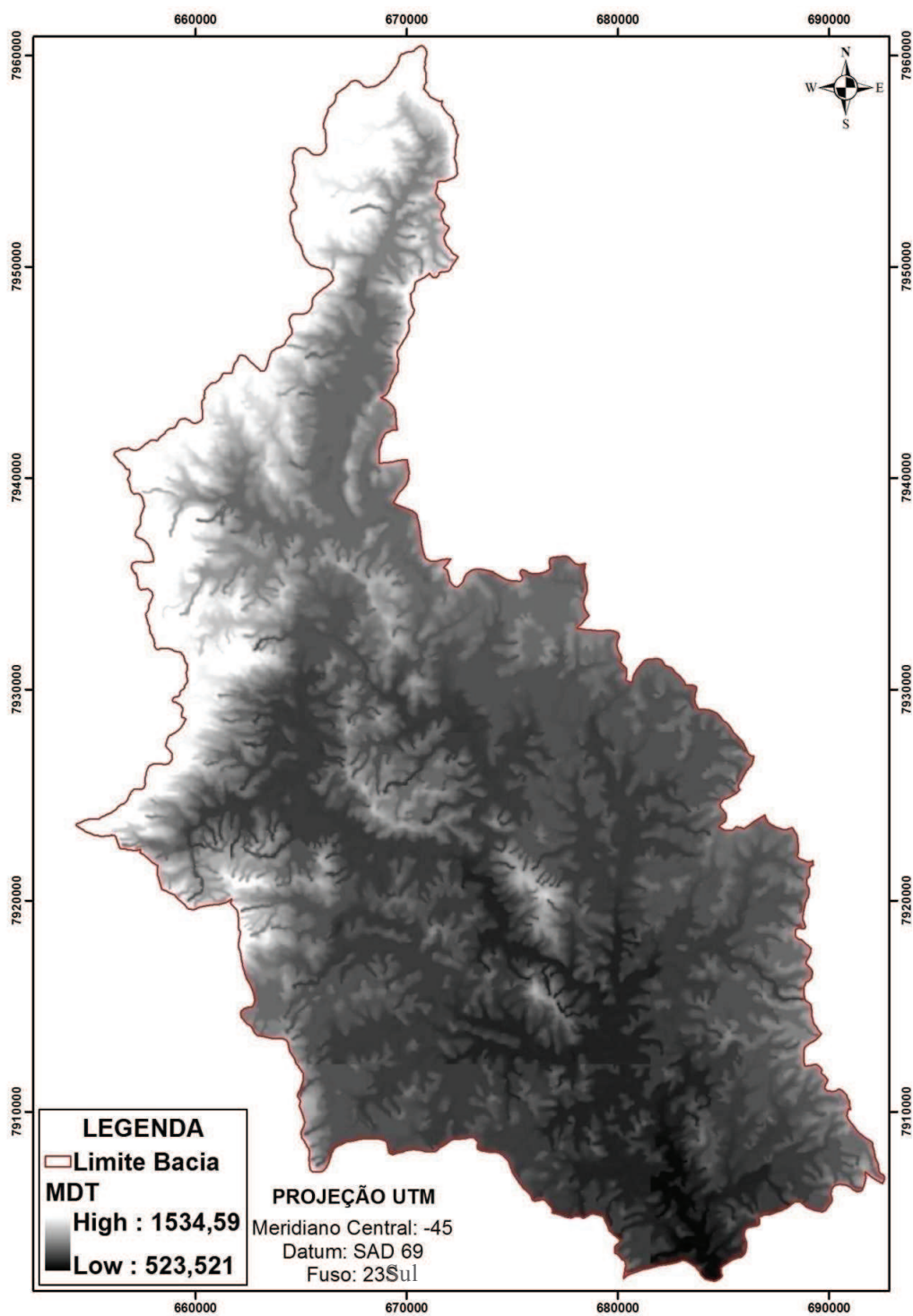


Figura 4.4 – Mapa hipsométrico da Sub-bacia 2.

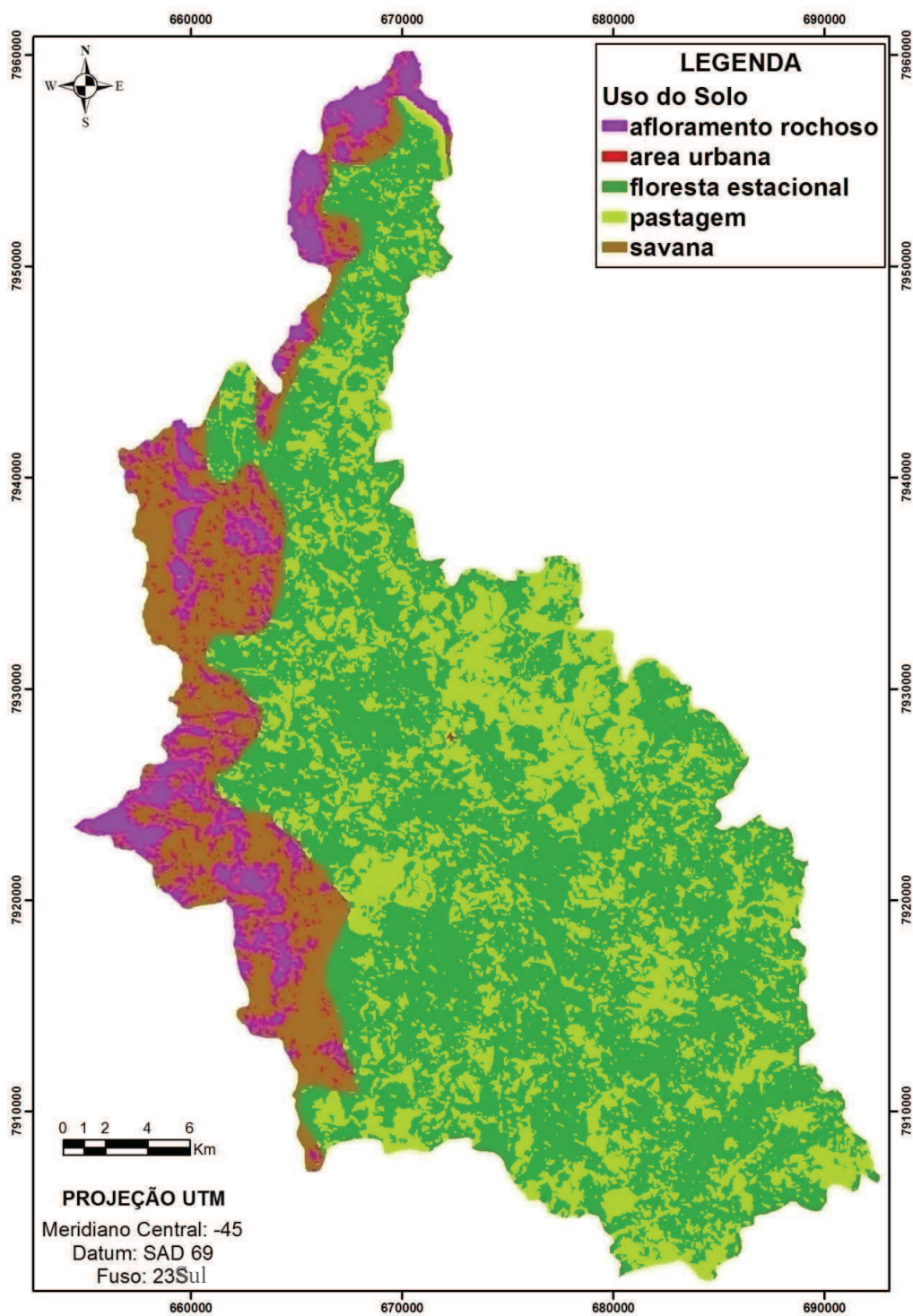


Figura 4.5 – Mapa de uso e ocupação do solo da Sub-bacia 2.

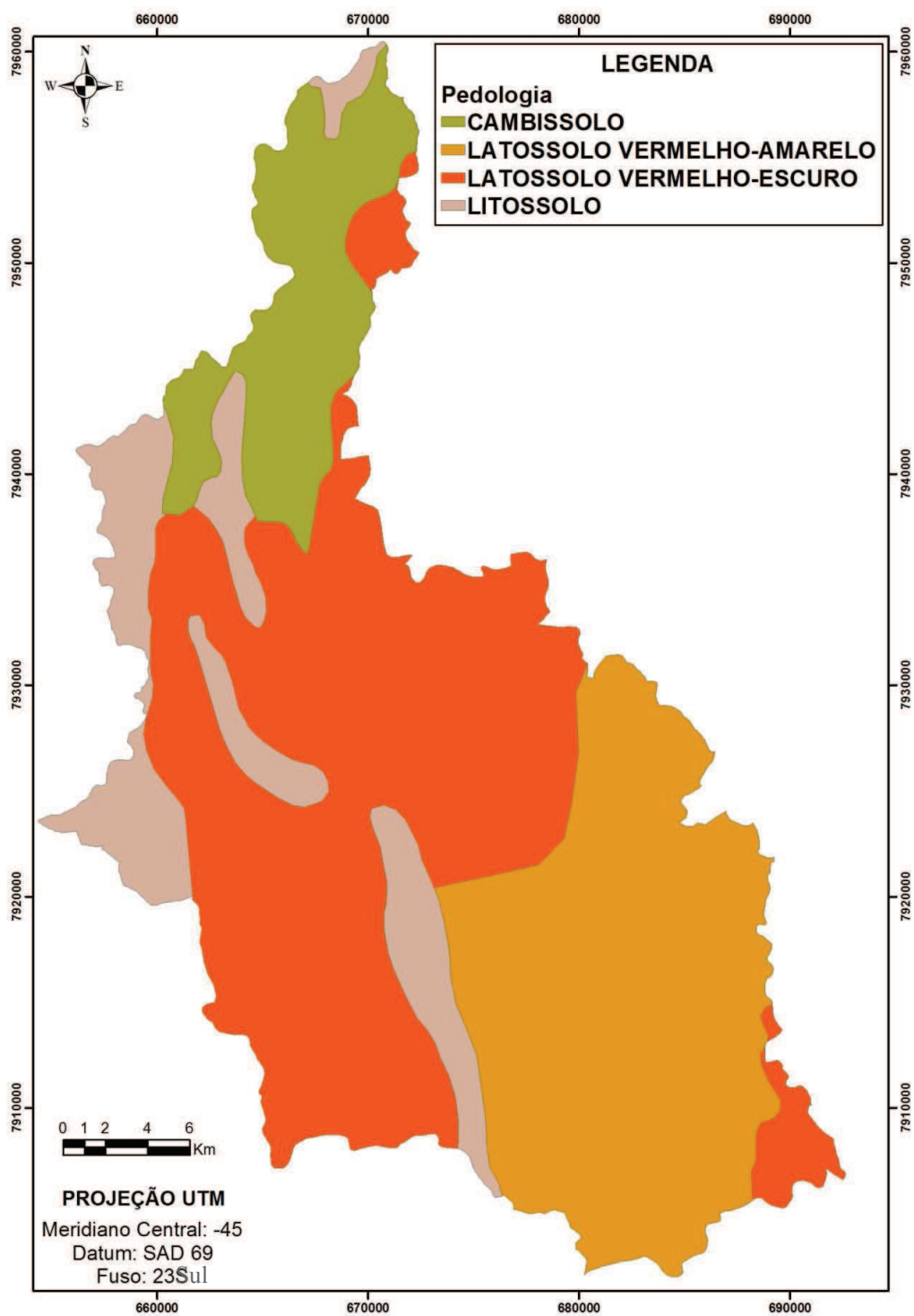


Figura 4.6 – Mapa pedológico da Sub-bacia 2.

4.2 Análise e compilação dos dados hidrometeorológicos

Os dados hidrometeorológicos compilados neste trabalho foram analisados para verificar a disponibilidade de dados no período coincidente para todas as estações. No entanto, para coincidir com o período de geração dos dados de uso e ocupação do solo, descrito anteriormente no Capítulo 3 – Seção 3.1.1 e utilizado para caracterização da bacia, foram tratados, preferencialmente, os dados compreendidos entre os anos de 2004 e 2007.

Uma vez verificado que os dados de precipitação estavam disponíveis para o período definido, foi realizada, com o auxílio de gráficos, uma avaliação de correlação entre as precipitações (P) ocorridas e as vazões observadas nas estações de referência. Para essa comparação foram usadas as precipitações médias calculadas através do Método de Thiessen (apresentado no Capítulo 2 – Seção 2.4.2.3).

Nas Figuras 4.7 a 4.9 e 4.10 a 4.12 pode-se observar os resultados das análises feitas para a Sub-bacia 1 e Sub-bacia 2, respectivamente.

A partir dessas análises foi confirmada a disponibilidade dos dados necessários para a realização da simulação hidrológica no modelo SMAP. Assim, o período de simulação hidrológica realizada na etapa de calibração do modelo inicia em 01/09/2004 e termina em 29/01/2007.

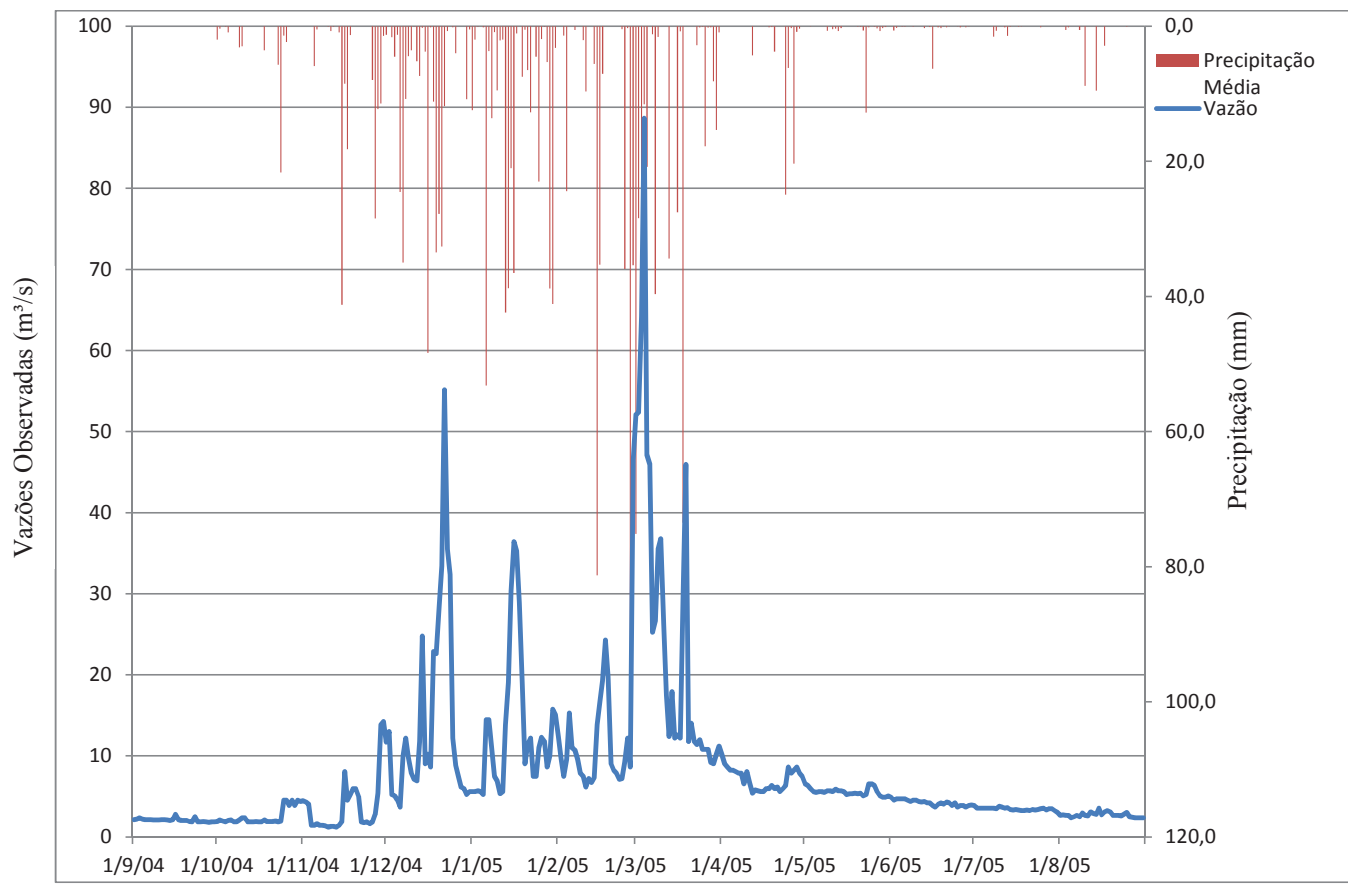


Figura 4.7 – Relação chuva-vazão na estação 56750000 – 01/09/2004 a 31/08/2005.

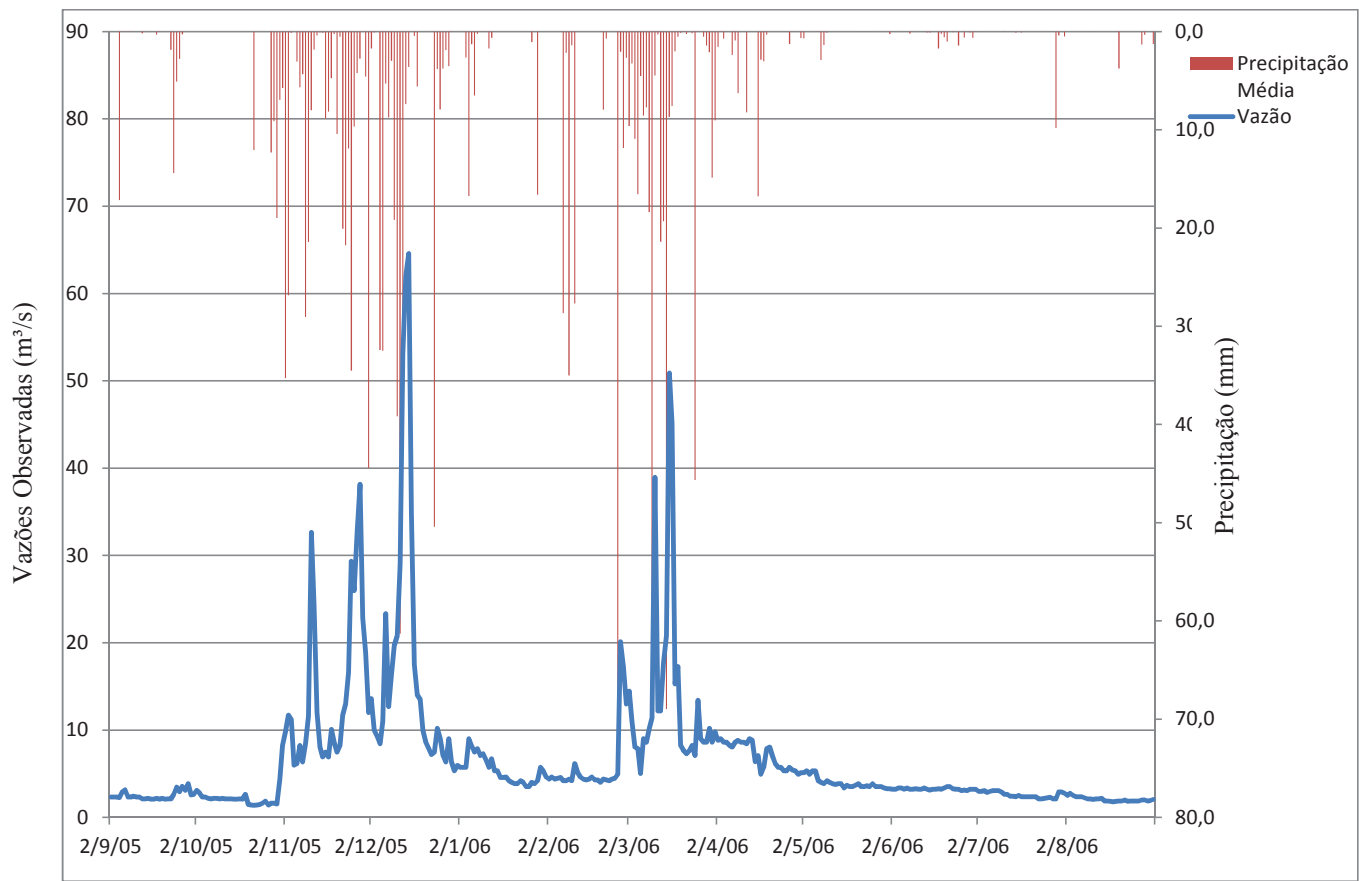


Figura 4.8 – Relação chuva-vazão na estação 56750000 – 01/09/2005 a 31/08/2006.

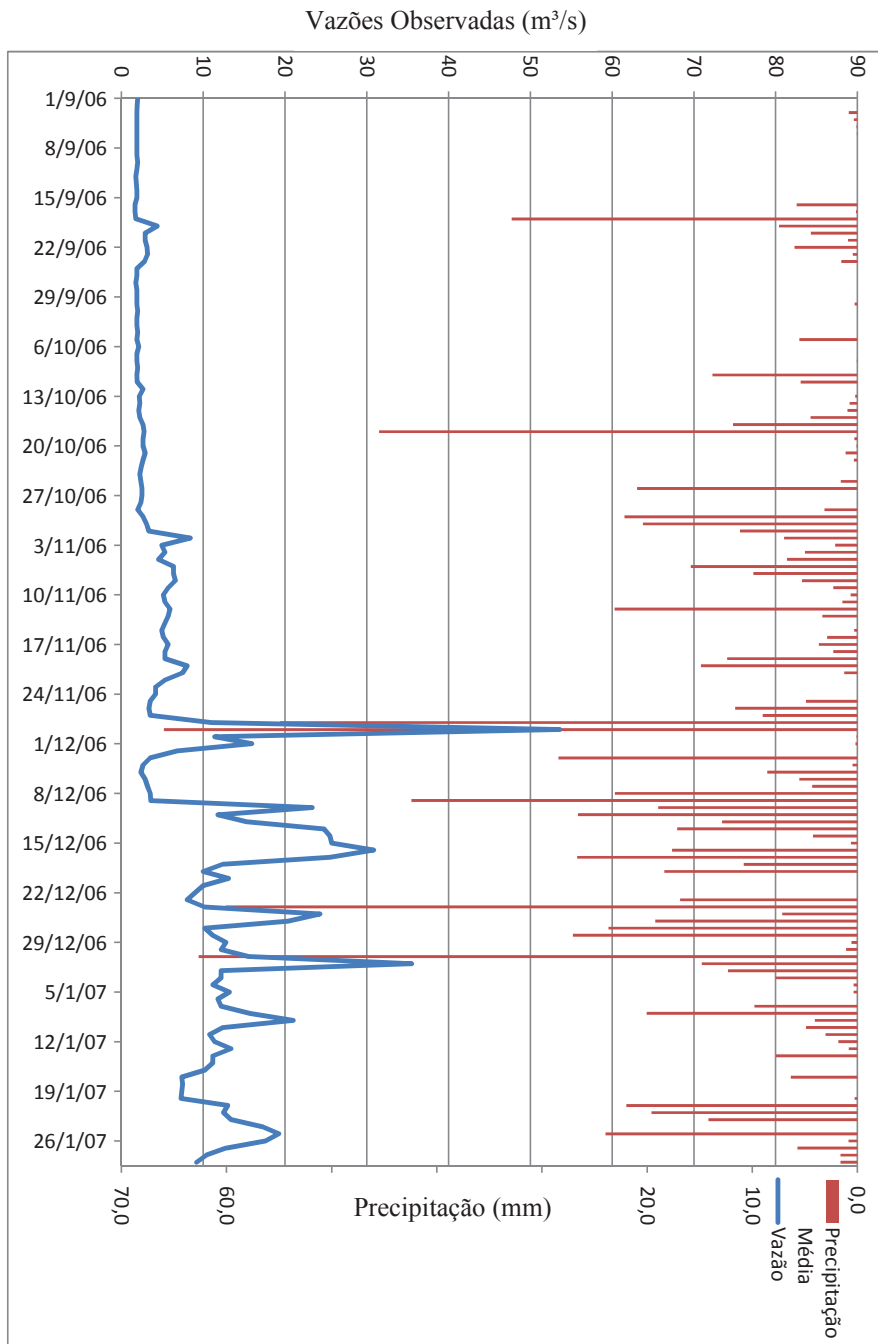


Figura 4.9 – Relação chuva-vazão na estação 56750000 – 01/09/2006 a 29/01/2007.

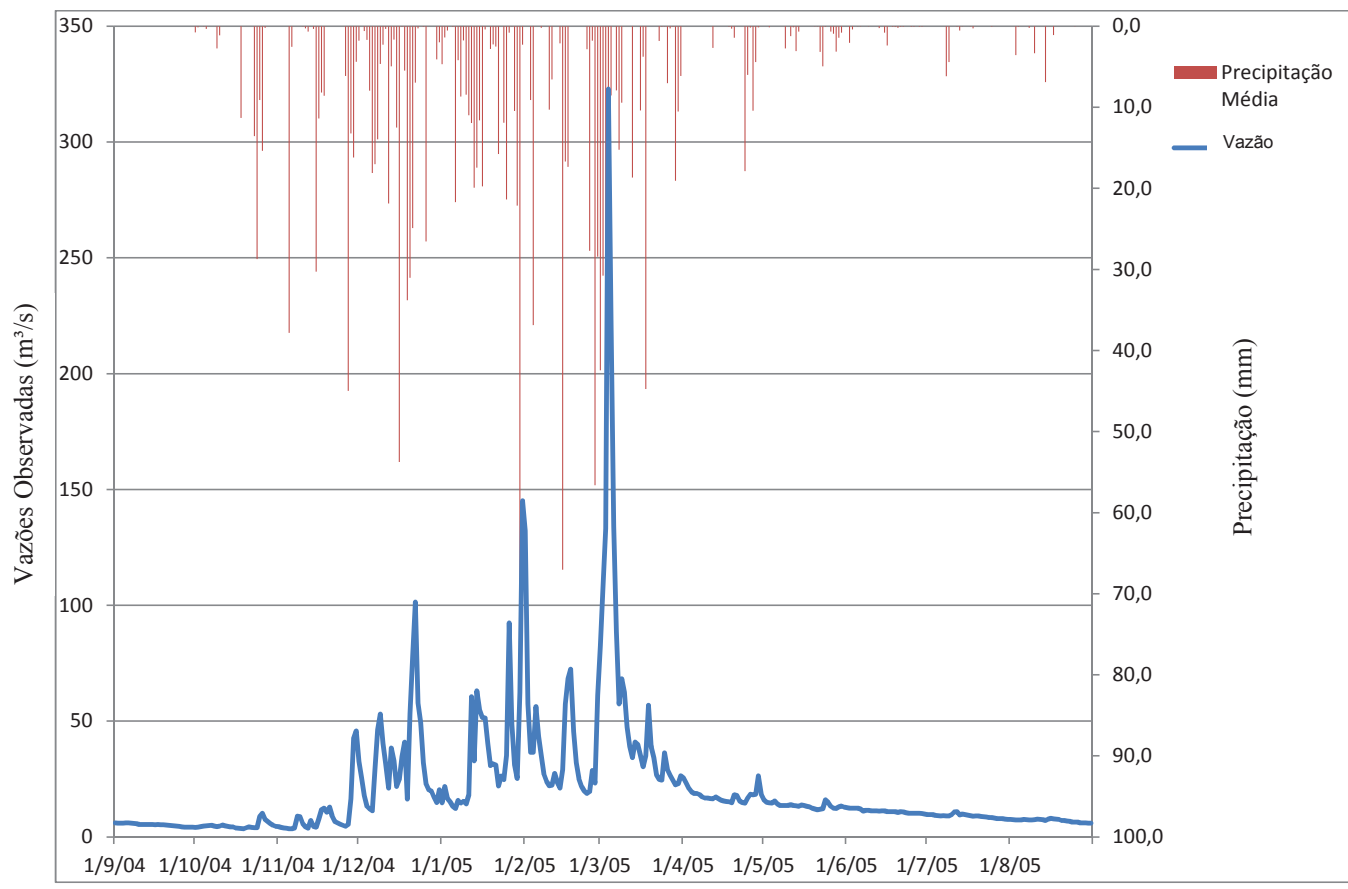


Figura 4.10 – Relação chuva-vazão na estação 56765000 – 01/09/2004 a 31/08/2005.

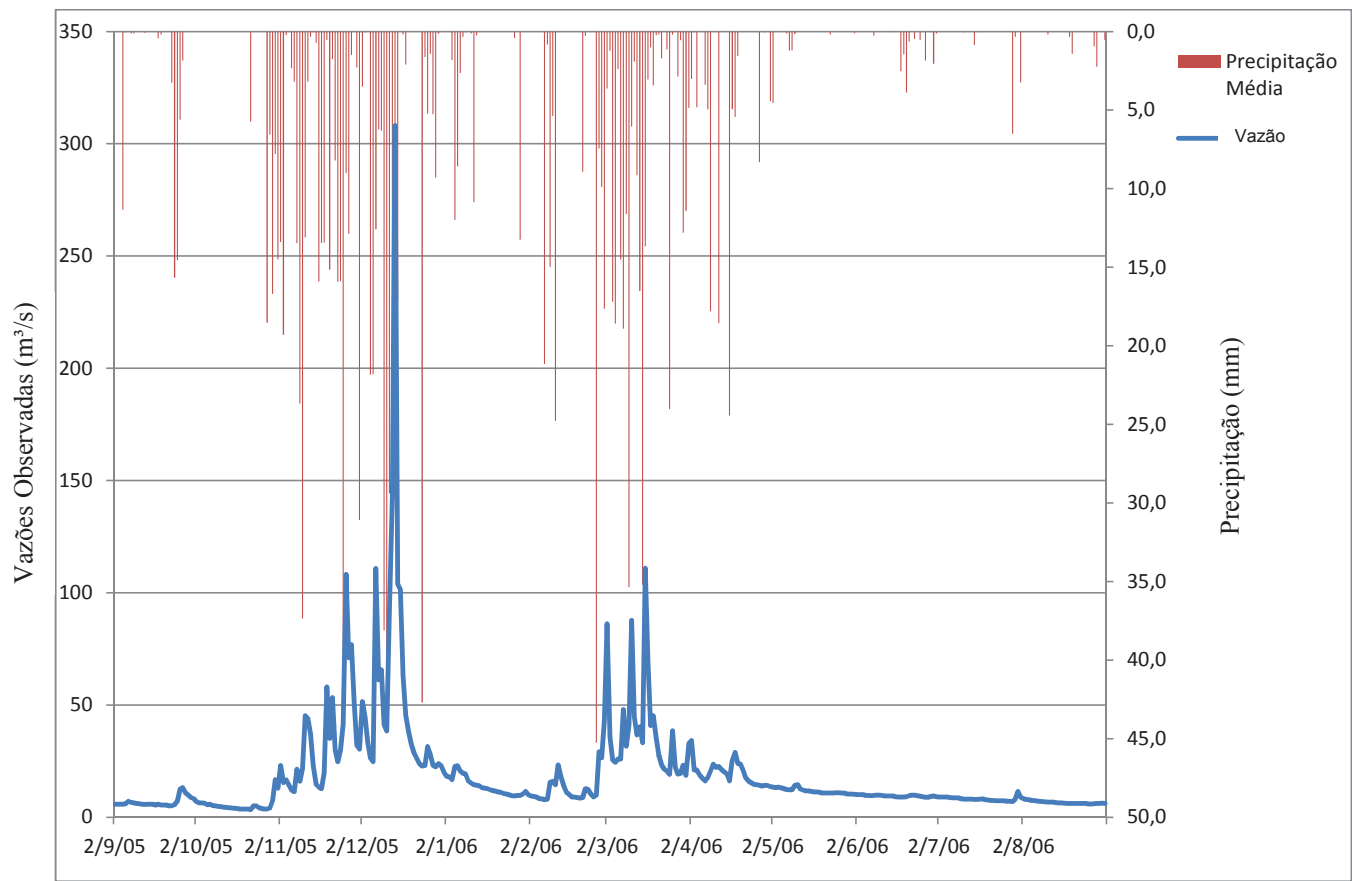


Figura 4.11 – Relação chuva-vazão na estação 56765000 – 01/09/2005 a 31/08/2006.

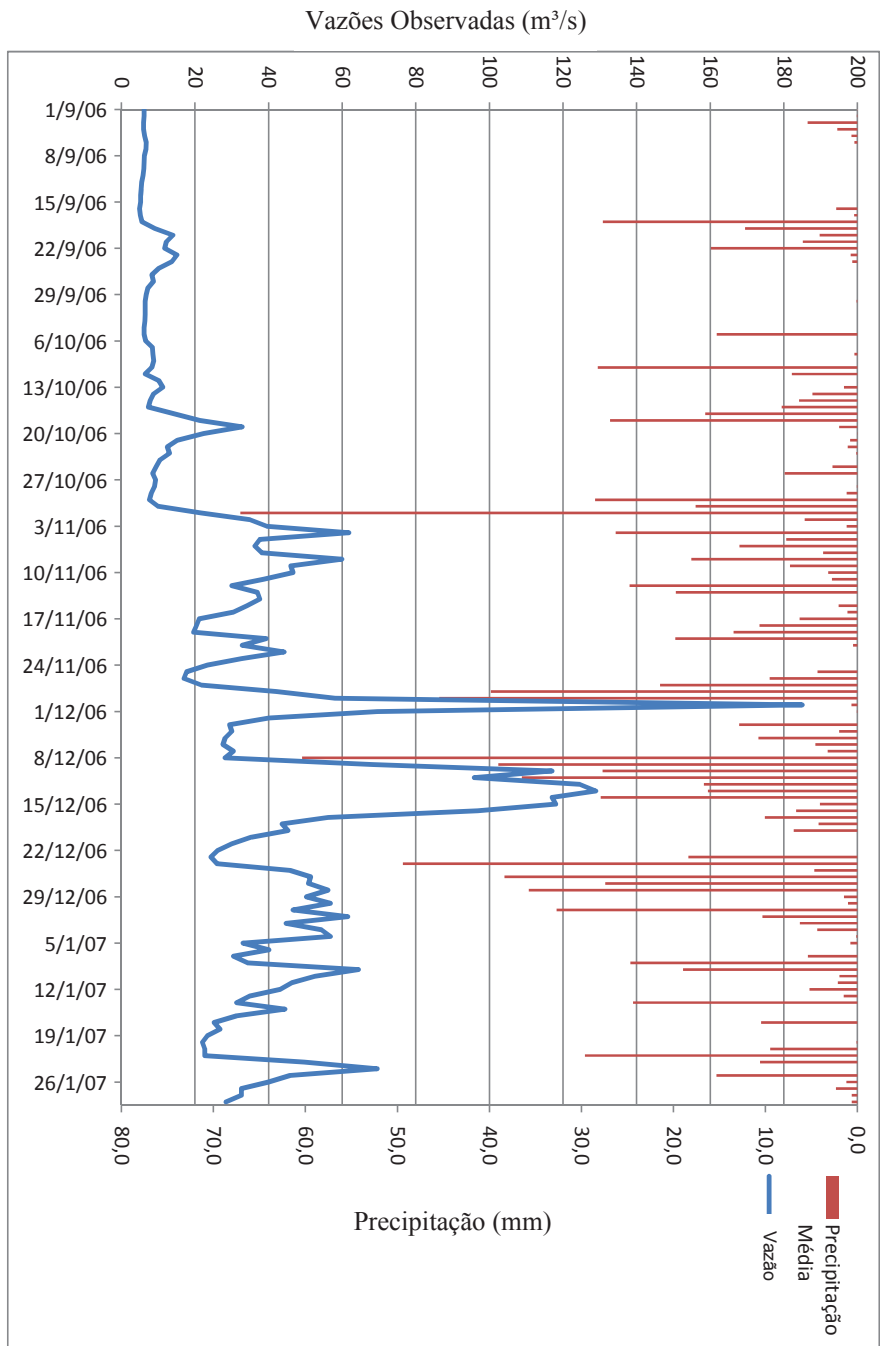


Figura 4.12 – Relação chuva-vazão na estação 56765000 – 01/09/2006 a 29/01/2007.

4.3 Simulação hidrológica

A simulação hidrológica foi realizada em duas etapas, calibração e validação, utilizando dois conjuntos de dados distintos.

Para a calibração dos parâmetros do modelo, utilizou-se a série de dados de 29 meses consecutivos: setembro de 2004 a janeiro de 2007. Para a etapa de validação do modelo, foi utilizada uma série de dados de 25 meses consecutivos: agosto/2007 a agosto/2009.

Conforme orientação no manual de utilização do modelo SMAP, os períodos utilizados no modelo iniciam-se com uma sucessão de dias sem ocorrência de precipitação e incluem nos seus dados registros de eventos de cheia ocorridos.

A seguir são apresentados os resultados para a Sub-bacia 1 e Sub-bacia 2.

4.3.1 Sub-bacia 1

Na calibração do modelo SMAP para a Sub-bacia 1, a correlação entre as vazões calculadas (Q_{calc}) e observadas (Q_{obs}), apresentada na Figura 4.13, tem coeficiente de determinação entre elas igual a 0,7458. Na Figura 4.14 são mostrados os hidrogramas das vazões calculadas e observadas.

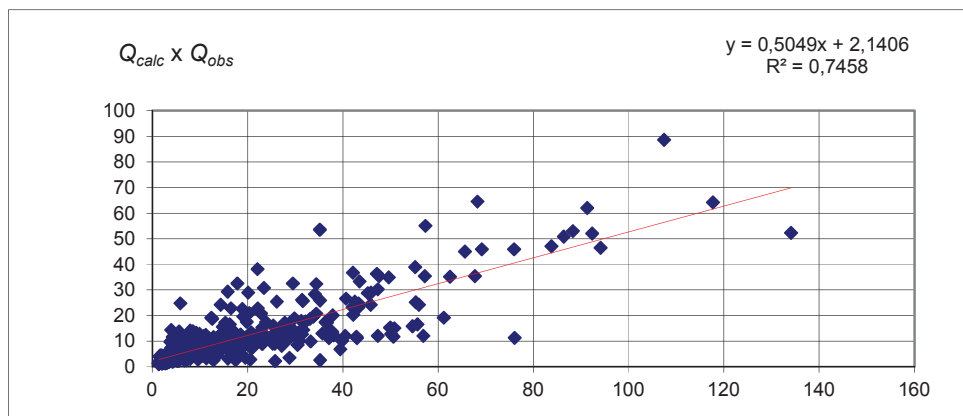


Figura 4.13 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na calibração do modelo para a Sub-bacia 1.

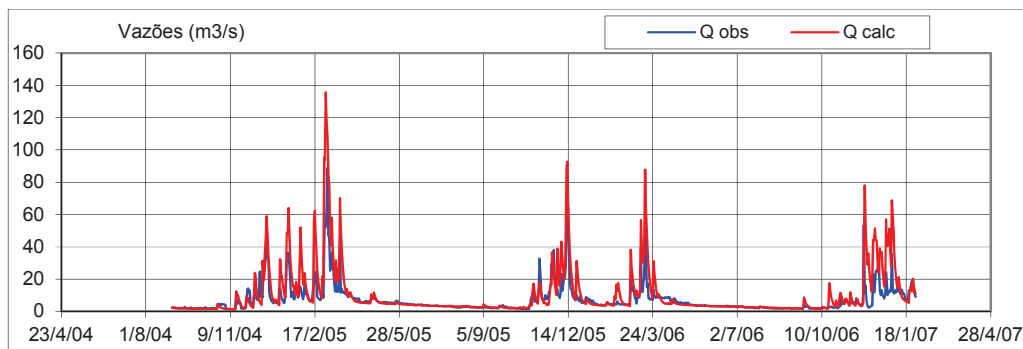


Figura 4.14 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1 na calibração do modelo.

Os valores calibrados dos parâmetros do modelo para alcançar esse resultado são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Relatório de calibração do modelo: Sub-bacia 1.

Inicialização:	Teor de Umidade Inicial (T_{uin})	50%
	Vazão Básica Inicial (E_{bin})	2,0 m ³ /s
Parâmetros:	Capacidade de Saturação do Solo (S_{tr})	110 mm
	Constante de Recessão do Escoamento Superficial (K_{2t})	2 dias
	Parâmetro de Recarga Subterrânea (C_{rec})	8%
	Abstração Inicial (A_i)	2,5 mm
	Capacidade de Campo (C_{apac})	40%
	Constante de Recessão do Escoamento Básico (K_{kt})	120 dias
Resultado:	Coefficiente de Determinação (R^2)	0,746

Os parâmetros de inicialização (T_{uin} e E_{bin}) são definidos a partir dos dados hidrometeorológicos. O primeiro indica o teor de umidade inicial do solo. Tendo o período de simulação iniciado ao final do período seco, considerou-se um armazenamento de metade da capacidade. O segundo parâmetro indica a vazão básica inicial para o período simulado, tendo sido considerado um valor próximo dos mínimos apresentados durante esse período.

As duas constantes de recessão utilizadas na modelagem (constante de recessão do escoamento superficial – K_{2t} e constante de recessão do escoamento básico – K_{kt}) também foram definidas a partir de análises dos dados hidrometeorológicos. A primeira constante mostra o tempo de resposta da bacia hidrográfica aos eventos chuvosos e a

segunda indica o período em que a manutenção das vazões no ponto de observação depende, principalmente, do escoamento de base.

O sistema de informações geográficas foi utilizado como ferramenta de suporte para estimação dos demais parâmetros: abstração inicial (A_i), capacidade de campo (C_{apac}), capacidade de saturação do solo (S_{tr}), e parâmetro de recarga subterrânea (C_{rec}). A análise dos dados físicos da bacia, sintetizados na Tabela 4.1, permitiu adotar valores iniciais para esses parâmetros na etapa de modelagem.

A predominância de áreas antropizadas, afloramentos rochosos e cobertura vegetal do tipo cerrado conferem à bacia uma baixa capacidade de abstração inicial. Assim, o parâmetro A_i foi estimado próximo ao limite inferior da faixa de variação indicada pelo autor do modelo (LOPES, 1999).

A capacidade de campo (C_{apac}) foi determinada no modelo pelas características do solo, assumindo o valor de 40% em função da predominância dos latossolos vermelhos que são solos bem drenados com características mistas entre solos arenosos e argilosos.

Com as características de uso e ocupação do solo e pedologia, juntamente com as declividades acentuadas típicas da bacia, os parâmetros S_{tr} e C_{rec} apresentam valores próximos aos limites inferiores das faixas de variação indicadas pelo autor do modelo (LOPES, 1999). Inicialmente os valores assumidos foram os limites inferiores e posteriormente calibrados manualmente até os valores ótimos de $S_{tr}=110$ mm e $C_{rec}=8\%$.

A análise dos hidrogramas apresentados na Figura 4.14 mostra o bom ajuste do modelo com os parâmetros adotados, considerando uma boa aderência entre as curvas de vazões observadas e calculadas.

Na etapa de validação do modelo para a Sub-bacia 1 foi utilizado o conjunto de parâmetros da calibração e o coeficiente de determinação entre as vazões calculadas (Q_{calc}) e observadas (Q_{obs}) foi de 0,6267 (Figura 4.15). Na Figura 4.16 são mostrados os hidrogramas das vazões calculadas e observadas.

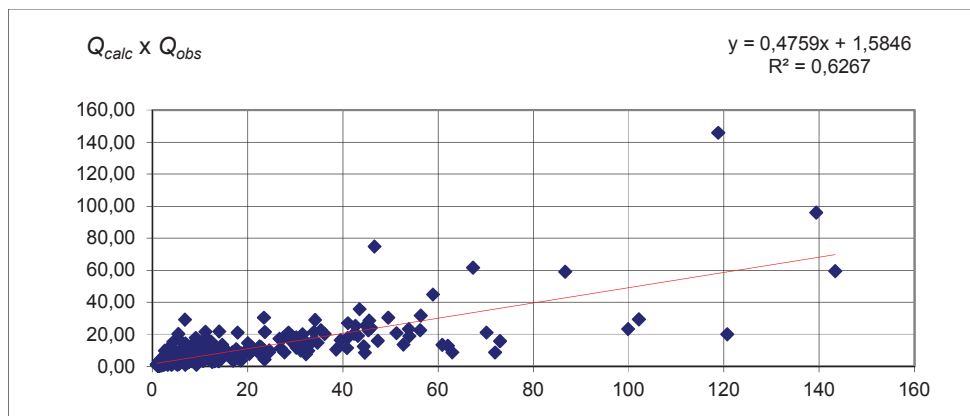


Figura 4.15 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na validação do modelo para a Sub-bacia 1.

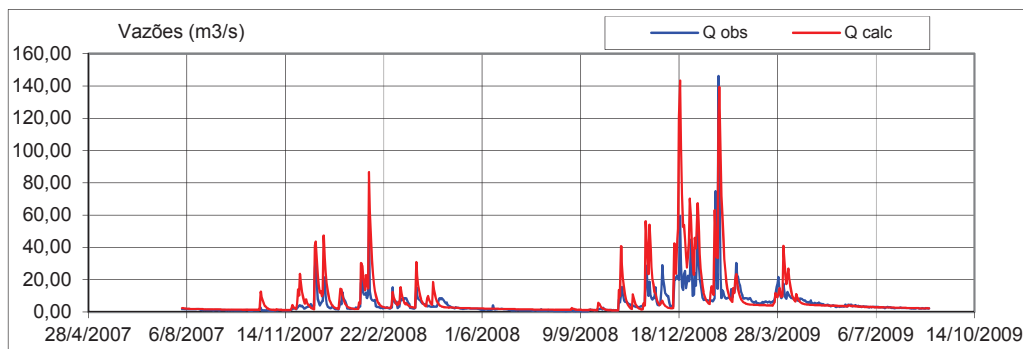


Figura 4.16 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1 na validação do modelo.

Os resultados mostrados nas Figuras 4.15 e 4.16, da etapa de validação, indicam boa correlação entre os valores de vazões observadas e calculadas. A exceção pode ser verificada, nesse caso, para os valores máximos, o que ocorre em função da necessidade de variação do coeficiente de recessão de escoamento superficial do período chuvoso, parâmetro obtido em função de dados hidrometeorológicos.

4.3.2 Sub-bacia 2

Na calibração do modelo SMAP para a Sub-bacia 2, o coeficiente de determinação alcançado, entre as vazões calculadas (Q_{calc}) e observadas (Q_{obs}), foi de 0,7678 (Figura 4.17). Os hidrogramas das vazões calculadas e observadas são mostrados na Figura 4.18.

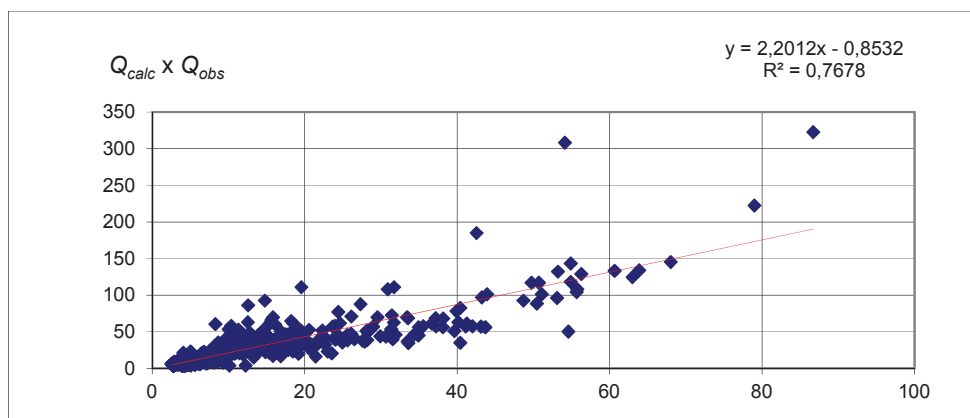


Figura 4.17 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na calibração do modelo para a Sub-bacia 2.

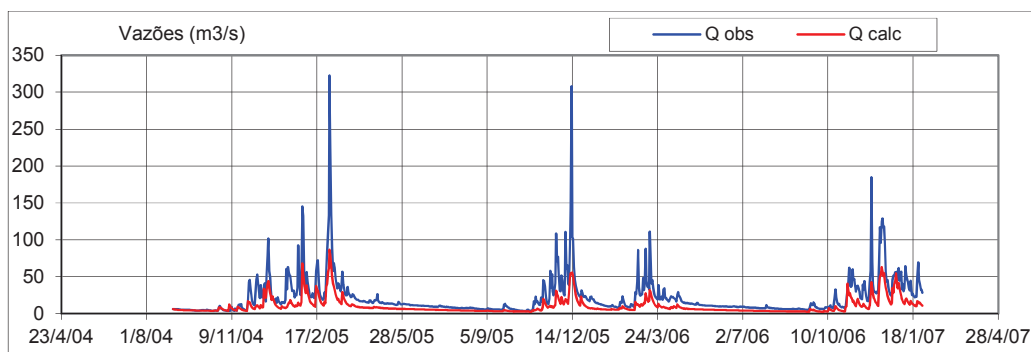


Figura 4.18 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 2 na calibração do modelo.

Os valores calibrados dos parâmetros do modelo para alcançar esse resultado são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Relatório de calibração do modelo: Sub-bacia 2.

Inicialização:	Teor de Umidade Inicial (T_{uin})	50%
	Vazão Básica Inicial (E_{bin})	5,0 m ³ /s
Parâmetros:	Capacidade de Saturação do Solo (S_{tr})	130 mm
	Constante de Recessão do Escoamento Superficial (K_{2t})	2,5 dias
	Parâmetro de Recarga Subterrânea (C_{rec})	12%
	Abstração Inicial (A_i)	3,0 mm
	Capacidade de Campo (C_{apc})	40%
	Constante de Recessão do Escoamento Básico (K_{kt})	120 dias
Resultado:	Coeficiente de Determinação (R^2)	0,768

Assim como para a Sub-bacia 1, os parâmetros de inicialização (T_{uin} e E_{bin}) e as constantes de recessão utilizadas na modelagem são definidas a partir dos dados hidrometeorológicos.

A análise dos dados físicos da bacia sintetizados na Tabela 4.2 – Seção 4.1.2 permite adotar valores iniciais para estes parâmetros na etapa de modelagem.

Em função da porção da bacia hidrográfica coberta pela vegetação do tipo Floresta Estacional (52,7%), o parâmetro A_i é próximo ao valor médio da faixa de variação indicada pelo autor do modelo (LOPES, 1999). Por sua vez, a predominância dos latossolos (vermelho-escuro e vermelho-amarelo) influencia a capacidade de campo (C_{apac}) que assume o valor de 40%.

Da mesma forma que a Sub-bacia 1, as características de uso e ocupação do solo e pedologia, juntamente com as declividades acentuadas típicas da bacia, os parâmetros S_{tr} e C_{rec} têm valores próximos aos limites inferiores das faixas de variação indicadas pelo autor do modelo (LOPES, 1999). Inicialmente os valores assumidos foram os limites inferiores e posteriormente calibrados manualmente até os valores ótimos de $S_{tr}=130$ mm e $C_{rec}=12\%$.

Da análise dos hidrogramas apresentados na Figura 4.18 observa-se um ajuste que reflete uma baixa aderência entre as curvas de vazões calculadas e observadas, apesar do valor do coeficiente de determinação ser alto.

Na etapa de validação do modelo para a Sub-bacia 2 foi utilizado o conjunto de parâmetros da calibração e coeficiente de determinação entre as vazões calculadas (Q_{calc}) e observadas (Q_{obs}) foi de 0,7044 (Figura 4.19). Na Figura 4.20 são mostrados os hidrogramas das vazões calculadas e observadas.

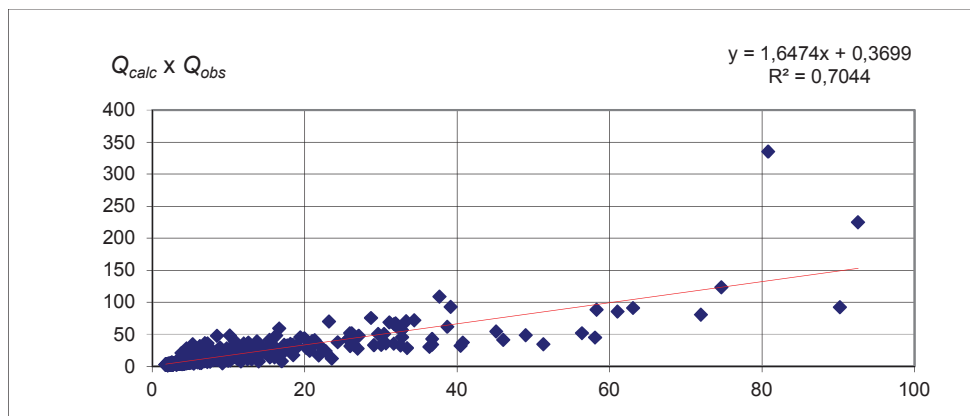


Figura 4.19 – Correlação entre as vazões calculadas e observadas na validação do modelo para a Sub-bacia 2.

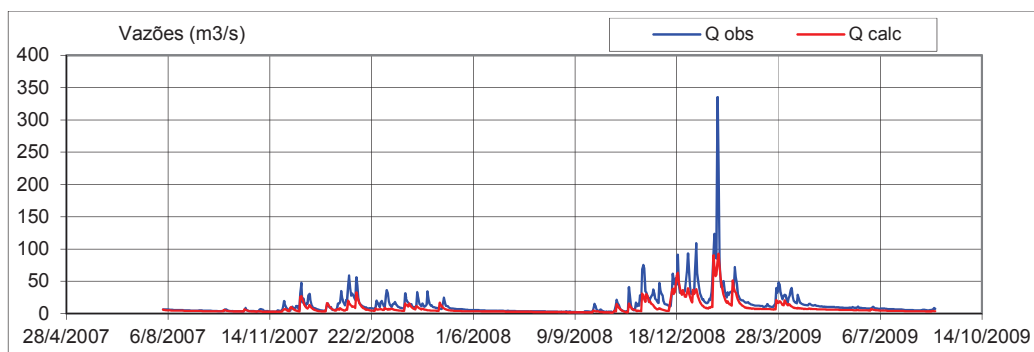


Figura 4.20 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 2 na validação do modelo.

Os resultados mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20 indicam uma boa correlação entre os valores de vazões observadas e calculadas. A exceção pode ser verificada, nesse caso, para os valores máximos calculados, que estão subestimados. Esse fato pode ser explicado em função da necessidade de ajuste na constante de recessão do escoamento superficial.

4.4 Análise de eficiência

A análise de eficiência dos cenários modelados foi testada por meio do coeficiente de Nash-Sutcliffe (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe dos cenários de calibração e validação para a Sub-bacia 1 e a Sub-bacia 2.

Cenário Simulado		<i>E</i>		
		Período Total	Período Seco	Período Chuvoso
Calibração	Sub-bacia	-0,14	0,95	-0,26
Validação	1	-0,22	0,50	-0,28
Calibração	Sub-bacia	0,36	0,76	0,32
Validação	2	0,52	0,67	0,50

A partir dos resultados obtidos, que apresentaram baixa eficiência nos cenários modelados para o período total de simulação, foram propostas e realizadas as avaliações de eficiência dos cenários dividindo em período seco e período chuvoso (Tabela 4.5). Adotou-se como limite desses dois períodos: outubro a março (período chuvoso) e abril a setembro (período seco). Dessa forma, os resultados obtidos apontam para um bom ajuste dos modelos para os períodos de seca, refletindo, assim, uma maior aderência entre os valores de vazão calculados e observados nos períodos de recessão. No entanto, os resultados obtidos para os períodos chuvosos não apresentaram uma boa aderência entre os valores comparados, o que refletiu o pior ajuste do modelo para previsão dos eventos de cheia.

Na avaliação que contempla os períodos chuvoso e seco, a eficiência do modelo para a Sub-bacia 1 ficou abaixo do aceitável que tem como limite mínimo 0,36; para a Sub-bacia 2 os resultados permitem classificar o desempenho do modelo como aceitável uma vez que os valores alcançados encontram-se entre os limites de 0,36 e 0,75. Esses resultados refletem a relevância dos eventos de cheia na avaliação de eficiência utilizando o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que valoriza mais as vazões máximas, uma vez que a amplitude entre os valores de vazão observada e calculada para o pico de cheias é bastante superior que a mesma amplitude para o período de recessão de vazões.

4.5 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade teve como objetivo verificar a influência de cada um dos parâmetros calibráveis de entrada da modelagem hidrológica no resultado final. Para essa análise adotou-se:

- o conjunto de parâmetros obtidos na etapa de calibração da modelagem hidrológica e variação individual dos 3 parâmetros calibráveis (S_{tr} , K_{2t} e C_{rec});
- sete cenários de simulação para cada bacia e cada parâmetro, aumentando ou reduzindo a faixa de variação indicada pelo autor do modelo (LOPES, 1999) para os parâmetros calibráveis da Tabela 4.6:
 - Cenário 1: aumento de 10%;
 - Cenário 2: aumento de 20%;
 - Cenário 3: aumento de 30%;
 - Cenário 4: redução de 10%;
 - Cenário 5: redução de 20%;
 - Cenário 6: redução de 30%;
 - Cenário 7: valor médio da faixa de variação.
- caso o aumento ou redução no valor do parâmetro ultrapassasse o limite da faixa de variação indicada por Lopes (1999) – Tabela 4.6, esse limite foi adotado.

Tabela 4.6 – Limites inferiores e superiores dos parâmetros S_{tr} , K_{2T} e C_{rec} na análise de sensibilidade.

Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior	Unidade
S_{tr}	100	2000	mm
K_{2t}	0,2	10	dias
C_{rec}	0	100	%

Fonte: Lopes (1999)

Na Tabela 4.7 são mostrados os resultados alcançados na simulação hidrológica nos diferentes cenários de análise de sensibilidade aos parâmetros S_{tr} , K_{2t} e C_{rec} na Sub-bacia 1 (ribeirão Santo Antônio). Analisando os resultados apresentados nessa tabela observa-se que, dentre os parâmetros que sofreram variação, a capacidade de saturação do solo (S_{tr}) resultou em maior influência sobre o coeficiente de determinação obtido. Como exemplo dessa observação são apresentados, na Figura 4.21, os hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1, com o acréscimo de 30% no parâmetro S_{tr} (Cenário 3).

Tabela 4.7– Resultados da análise de sensibilidade aos parâmetros S_{tr} , K_{2t} e C_{rec} : Sub-bacia 1.

Sub-bacia 1			
Cenários	Parâmetro Avaliado	R^2	Varição em Relação ao R^2 de Calibração (%)
+ 10%	S_{tr}	0,679	-9,0%
	K_{2t}	0,735	-1,5%
	C_{rec}	0,734	-1,6%
- 10%	S_{tr}	0,746	0,0%
	K_{2t}	0,669	-10,3%
	C_{rec}	0,732	-1,9%
+ 20%	S_{tr}	0,547	-26,7%
	K_{2t}	0,704	-5,6%
	C_{rec}	0,730	-2,1%
- 20%	S_{tr}	0,746	0,0%
	K_{2t}	0,414	-44,5%
	C_{rec}	0,732	-1,9%
+ 30%	S_{tr}	0,412	-44,8%
	K_{2t}	0,670	-10,2%
	C_{rec}	0,723	-3,1%
- 30%	S_{tr}	0,746	0,0%
	K_{2t}	0,414	-44,5%
	C_{rec}	0,732	-1,9%
Valor Médio	S_{tr}	0,235	-68,5%
	K_{2t}	0,665	-10,9%
	C_{rec}	0,716	-4,0%

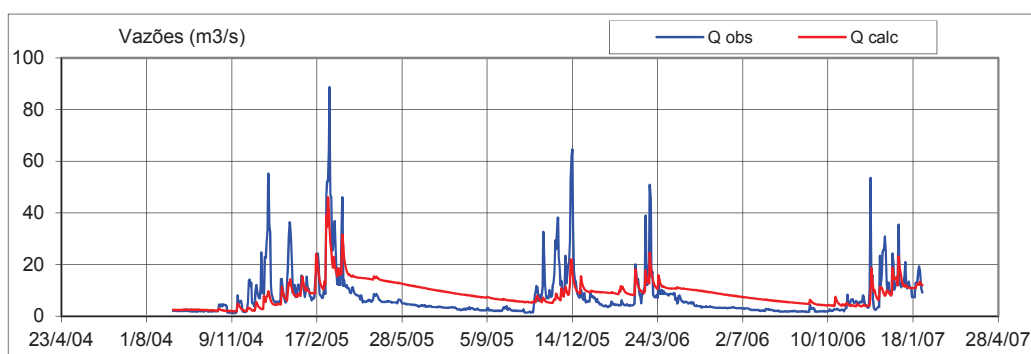


Figura 4.21 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1: acréscimo de 30% em S_{tr} (Cenário 3).

Nos hidrogramas da Figura 4.21 pode-se observar que os valores das vazões calculadas são inferiores aos valores observados no período chuvoso. Esse efeito pode ser explicado em função da influência do parâmetro S_{tr} na geração do escoamento

superficial. Com o aumento da capacidade de saturação do solo o volume de água armazenado no solo aumenta, sendo reduzidas as vazões escoadas no período chuvoso. Esse efeito leva a uma superestimação dos valores de vazões calculadas durante o período seco, uma vez que esse volume armazenado é liberado durante esse período. Vale ressaltar que o valor do S_{tr} na calibração foi de 110 mm e, portanto, bem próximo do limite inferior da faixa de variação (100 mm). Nesse sentido, os Cenários 4, 5 e 6 tiveram valores de coeficiente de determinação semelhantes e próximos do cenário original em função da pequena variação nesse parâmetro.

Como exemplo da análise de sensibilidade quanto ao parâmetro K_{2t} (constante de recessão do escoamento superficial), na Figura 4.22 são apresentados os hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1, com redução de 20% nesse parâmetro (Cenário 5).

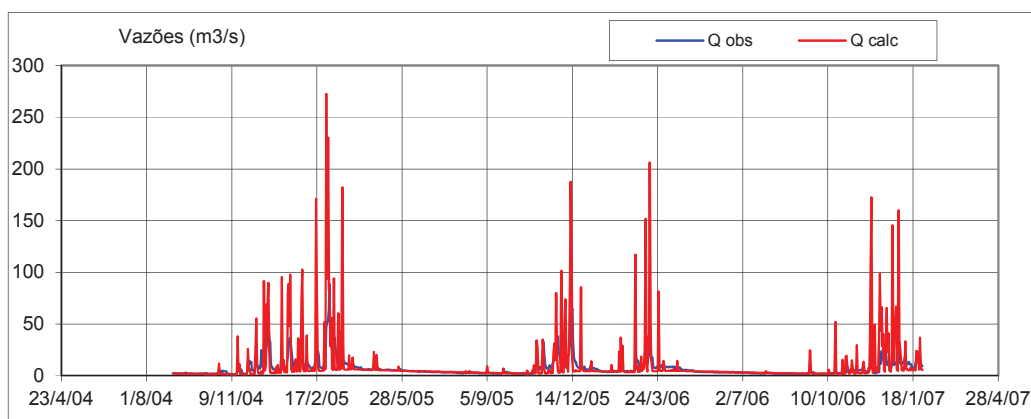


Figura 4.22 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1: redução de 20% em K_{2t} (Cenário 5).

Nos hidrogramas da Figura 4.22 tem-se que os valores das vazões calculadas para o período chuvoso são superiores aos valores observados. Isso ocorre, pois a redução na constante de recessão do escoamento superficial torna menor o tempo de resposta da bacia hidrográfica aos eventos chuvosos. Por outro lado, esse parâmetro não influencia os resultados obtidos para o período seco.

Como exemplo da análise de sensibilidade quanto ao parâmetro C_{rec} (recarga de água), na Figura 4.23 são apresentados os hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1, utilizando a média da faixa de variação desse parâmetro (Cenário 7).

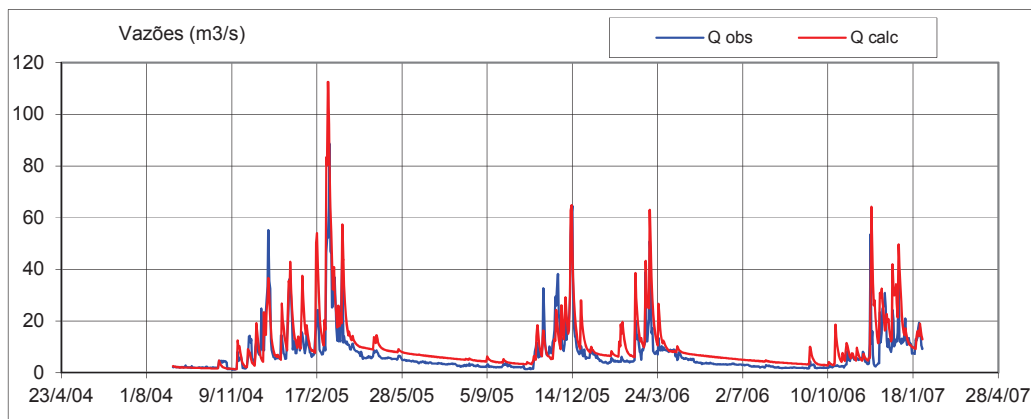


Figura 4.23 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas para a Sub-bacia 1: C_{rec} igual a média da sua faixa de variação (Cenário 7).

Nos hidrogramas da Figura 4.23 pode-se observar que o coeficiente de determinação é pouco influenciado, mesmo com a variação significativa do parâmetro. No período seco são evidenciadas as maiores diferenças. Isso pode ser explicado pelo fato das vazões calculadas neste período levarem em conta o incremento resultante do armazenamento no solo dos volumes infiltrados durante os eventos de precipitação.

Na Tabela 4.8 são mostrados os resultados alcançados na simulação hidrológica nos diferentes cenários de análise de sensibilidade aos parâmetros S_w , K_{2t} e C_{rec} na Sub-bacia 2 (rio do Peixe). Assim como os resultados apresentados na análise de sensibilidade realizada na Sub-bacia 1, os parâmetros seguem a mesma ordem de influência sobre o coeficiente de determinação. Da mesma forma, as tendências presentes nas correlações entre as vazões calculadas e observadas nos períodos seco e chuvoso são semelhantes.

Tabela 4.8 – Resultados da análise de sensibilidade aos parâmetros S_{tr} , K_{2t} e C_{rec} : Sub-bacia 2.

Sub-bacia 2			
Cenários Definidos	Parâmetro Avaliado	R^2	Variação em Relação ao R^2 de Calibração (%)
+ 10%	S_{tr}	0,654	-14,8%
	K_{2t}	0,730	-4,9%
	C_{rec}	0,761	-0,9%
- 10%	S_{tr}	0,768	0,0%
	K_{2t}	0,767	-0,1%
	C_{rec}	0,758	-1,3%
+ 20%	S_{tr}	0,472	-38,5%
	K_{2t}	0,687	-10,5%
	C_{rec}	0,753	-2,0%
- 20%	S_{tr}	0,768	0,0%
	K_{2t}	0,587	-23,6%
	C_{rec}	0,520	-32,3%
+ 30%	S_{tr}	0,334	-56,5%
	K_{2t}	0,647	-15,8%
	C_{rec}	0,746	-2,9%
- 30%	S_{tr}	0,768	0,0%
	K_{2t}	0,442	-42,4%
	C_{rec}	0,521	-32,2%
Valor Médio	S_{tr}	0,198	-74,2%
	K_{2t}	0,660	-14,1%
	C_{rec}	0,741	-3,5%

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, com base nos objetivos propostos, foi explorado o potencial de uso de sistemas de informações geográficas (SIG) no tratamento de dados e informações georreferenciadas para estimação de parâmetros de entrada da modelagem hidrológica. Foi também realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no modelo SMAP. Diante disso, o presente capítulo apresenta as conclusões relevantes alcançadas. Além disso, são apresentadas também algumas perspectivas para futuros trabalhos no âmbito das técnicas de modelagem hidrológica suportada por sistemas de informações geográficas.

A compilação de dados de pedologia, uso e ocupação de solo, altimetria, rede hidrográfica e outros atributos em ambiente SIG suportou, neste trabalho, o entendimento das áreas de estudo e a estimativa dos parâmetros de entrada para a modelagem hidrológica utilizando o modelo do tipo concentrado, o SMAP.

Os parâmetros da modelagem que remetem às características físicas das sub-bacias foram estimados por meio de um sistema de informações geográficas. Mesmo no caso de parâmetros de obtenção por meio de monitoramento hidrometeorológico, como é o caso da precipitação média na bacia, o ambiente SIG foi utilizado para a avaliação da área de influência de cada estação pluviométrica, por meio do método de Thiessen.

Dessa forma, a principal conclusão, nesse aspecto, refere-se aos bons resultados obtidos com o modelo em função do apoio do SIG na obtenção dos parâmetros necessários à modelagem. Os resultados alcançados nas etapas de calibração e validação para cada uma das sub-bacias indicam que a integração entre sistemas de informações geográficas e modelos hidrológicos oferece a especialistas e usuários uma ferramenta de suporte à modelagem no contexto dos recursos hídricos.

Ainda relacionada a esse aspecto, outra conclusão é o fato de que, não necessariamente, os valores iniciais obtidos para os parâmetros do modelo com o suporte de um SIG resultam no melhor ajuste da calibração. Os valores obtidos para os parâmetros com o suporte de SIG foram úteis como aproximação inicial, sendo que o ajuste fino para a

obtenção dos “valores ótimos” para cada parâmetro foi realizado por meio da calibração manual do modelo, por meio do especialista.

A modelagem hidrológica com suporte de um SIG mostrou-se eficiente nas simulações realizadas para as sub-bacias em estudo na bacia do rio Santo Antônio com o uso do modelo SMAP.

Resultados semelhantes entre os períodos de calibração e validação do modelo foram encontrados, em especial para os períodos secos, indicando que os conjuntos de parâmetros utilizados podem fornecer estimativas consistentes de vazões em estudos de predição e previsão nas sub-bacias.

Portanto, conclui-se, mesmo que de forma preliminar, que para o modelo SMAP, o uso de um SIG pode levar a uma boa calibração de parâmetros. Salieta-se que o resultado alcançado com os parâmetros faz referência às sub-bacias estudadas, devendo ser revistos e adequados para outras áreas. Por esse motivo, essa conclusão é considerada ainda preliminar, devendo ser validada com a aplicação da mesma metodologia aplicada neste estudo em outras bacias hidrográficas.

A análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada da modelagem hidrológica realizada permitiu evidenciar os parâmetros mais relevantes dentre o conjunto de parâmetros utilizado em cada cenário de simulação hidrológica.

Um resultado importante obtido, referente à análise de sensibilidade, refere-se ao parâmetro de capacidade de saturação do solo (S_{tr}), que foi definido por meio dos dados e informações das características físicas da área de estudo, e que foi aquele que apresentou a maior influência nos resultados. Dessa forma, pode ser concluído que, para a obtenção de bons resultados na modelagem hidrológica em questão, deve-se empenhar na busca de valores mais ajustados para esse parâmetro, ou seja, dentre os parâmetros calibráveis do modelo, o analista deve concentrar seus esforços na obtenção de índices mais acurados para esse parâmetro.

Outro parâmetro, cuja análise de sensibilidade levou a variações significativas nos resultados da simulação, foi a constante de recessão do escoamento superficial (K_{2t}), que foi extraído por meio da análise de dados hidrometeorológicos. Isso reforça a

importância da experiência do hidrólogo para a obtenção de valores adequados para os parâmetros que não têm relação direta com as informações geográficas. Não basta um SIG para a obtenção dos parâmetros de origem geográfica, a experiência e sensibilidade do hidrólogo também são necessárias na obtenção de bons resultados na modelagem.

Conclui-se também que a etapa inicial, de busca e obtenção de dados adequados que subsidiem uma primeira aproximação e definição dos parâmetros de entrada da modelagem pode levar a melhores resultados na etapa de simulação hidrológica.

Para continuação e complementação deste trabalho têm-se algumas perspectivas para o desenvolvimento de novos estudos.

Quanto à estimativa de parâmetros de entrada da modelagem hidrológica, constatou-se a viabilidade do uso de SIG como ferramenta de suporte para aplicação do modelo SMAP nas etapas de simulação. Assim, percebeu-se que a integração proposta entre as duas ferramentas pode ser explorada em novos estudos em bacias hidrográficas de diferentes regiões.

Outra perspectiva trata-se do uso de diferentes modelos, com características distintas, como no caso de uma comparação entre modelos concentrados e distribuídos, para verificação da utilidade e necessidade de um SIG no suporte à modelagem hidrológica.

Quanto à análise de sensibilidade de parâmetros, vislumbra-se a possibilidade de realização de novos trabalhos que visem simplificar a modelagem hidrológica utilizando o modelo SMAP através da redução do número de parâmetros de entrada. Essa redução poderia ser orientada pelo grau de relevância dos parâmetros apresentados na análise de sensibilidade.

Com a realização de novos estudos para outras bacias hidrográficas, há a possibilidade de proposição de uma metodologia para a definição de parte dos parâmetros de modelagem hidrológica com base em características geográficas de cada bacia. Por exemplo, em função das características de uso e ocupação do solo e da pedologia de uma bacia indicar valores possíveis para uma primeira aproximação de parâmetros dependentes desses fatores.

Outra perspectiva de estudo refere-se à possibilidade de previsão de cenários de vazões e hidrogramas de uma bacia por meio da avaliação de variação de tipologias de vegetação, urbanização de uma área, troca da cobertura vegetal ou desmatamento. Com o suporte de SIG na obtenção de valores de parâmetros para a modelagem hidrológica, é possível estimar a variação desses parâmetros em função da modificação da cobertura vegetal de uma bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEVEN, K. J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. TOPMODEL. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications, p. 627-668, 1995.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ontario: Delta Printing, 1994, 398 p.
- BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 470
- BREMICKER, M. **Aufbaueines Wasserhaushaltsmodellsfür das Weser und das OstseeEinzugsgebietalsBausteineinesAtmosphären-Hydrologie-Modells**. Dissertation Doktorgrad, GeowissenschaftlicherFakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg, Juli. 1998.
- BUCHIANERI, V. C. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio par o plano de manejo da bacia do rio Grande de Ubatuba**. 2004. 105 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais – Conservação de Ecossistemas) – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP/ESALQ), Piracicaba, 2004.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 356 p.
- CALIJURI, M. L.; MEIRA, A. D.; PRUSK, F. F. Geoprocessamento aplicado aos recursos hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, Brasil. **Anais...** Lavras: UFLA, SBEA, 1998, p. 200-225.
- CÂMARA NETO, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. 282 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. 1995. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.29.07.25>>. Acesso em: 15 set. 2011.
- CHIARI, G. R. P.; COSTA, J. C. E.;BOTELHO, L. C. M. Previsão de aflúncias na CEMIG: aplicação do sistema de simulação hidrológica rio grande para a bacia incremental do rio Paranaíba entre as UHE's Itumbiara e São Simão.2007. In: WORKSHOP PREVISÃO DE VAZÕES, 1., Rio de Janeiro, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, 2007. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o17.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2011.
- CHRISTOFOLETTI, A. Morfologia de bacias de drenagem. **Noticiário Geomorfológico**, v. 18, p. 130-132, 1978.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236 p.

- COLLISCHONN, B. **Uso da precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. 193 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/7684>>. Acesso em: 20 set. 2011.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/ClimaRH/teses/teseWalter.htm>>. Acesso em: 10 set. 2011.
- ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large scale rainfall-runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895, 2007.
- CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. K. **Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV**. Stanford: Department of Civil Engineer, Stanford University, 1996. (Technical Report n. 39).
- CYSNE, J. R. **Modelo conceitual para gerenciamento de recursos hídricos em ambiente de SIG**. 2004. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2004.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO (DAEESP). **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo: DAEESP – Diretoria de Procedimentos de Outorga e Fiscalização, 2005. 116 p.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Avaliação ambiental integrada dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do Rio Doce**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 5 set. 2011.
- FADIGA JR, F. M.; LOPES, J. E. G.; MARTINS, J. R. S.; BARROS, M. T. L.; SANTOS, R. C. P. Modelos de previsão de vazões para a bacia incremental à UHE Itaipu. In: WORKSHOP PREVISÃO DE VAZÕES, 1., Rio de Janeiro, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, 2007. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o23.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2012.
- GETIRANA, A. C. V. **Contribuições da altimetria espacial à modelagem hidrológica de grandes bacias na Amazônia**, 2009. 514 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.lamemo.coppe.ufrj.br/teses/GETIRANA_ACV_09_t_D_.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2012.
- GOMES, M; RODRIGUES, R. Modelação hidrológica distribuída: aplicação à bacia do Guadiana. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 4., 1998, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa, 1998.
- GOODCHILD, M. F. The state of GIS for environmental problem-solving. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, T. (Ed.). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. p. 8-15.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Carta do Brasil**: folha Presidente Kubitscheck. SE-23-Z-A-VI. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. Escala 1:100.000.
- IBGE **Carta do Brasil**: folha Rio Vermelho. SE-23-Z-B-I. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. Escala 1:100.000.
- IBGE **Carta do Brasil**: folha Serro. SE-23-Z-B-IV. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. Escala 1:100.000.
- IBGE **Mapa pedologia** – escala 1:100.000 – IBGE, folha: Serro SE-23-Z-B-IV, 1978.
- KOUWEN, N.; SOULIS, E. D.; PIETRONIRO, A.; DONALD, J.; HARRINGTON, R. A. Grouping response units for distributed hydrologic modelling. **Journal of Water Resources Management and Planning**, v. 119, n. 3, p. 289-305, 1993.
- LARENTIS, D. G. **Modelagem da matemática da qualidade da água em grandes bacias**: sistema Taquari-Antas-RS. 2004. 177 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3900>>. Acesso em: 20 jul. 2011.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 99(D7), p. 14415-14428, 1994.
- LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. (Eds.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2 ed. São Paulo: EdUSP, 2000. p. 33-43.
- LOPES, J. E. G. **Manual do modelo SMAP**. 1999.
- BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP: a simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology**. Water Resources Publications, 1982.
- MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 166 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP/ESALQ), Piracicaba, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/111143/tde-10072002-161200/pt-br.php>>. Acesso em: 2 out. 2011
- MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. **Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 1, p. 147-155, 2003.
- MENDES FILHO, W. M.; VENDRAME, I. F.; CARVALHO, R. G. Utilização de sistema de informações geográficas para o mapeamento do potencial de retenção de águas pluviais no município de São José dos Campos – SP. In: SIMPÓSIO

- BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3453-3460.
- MONTE-MOR, R. C. A. **Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro**. 2012. 281 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2012.
- NAGHETTINI, M. C.; NASCIMENTO, N. O.; THIMOTTI, T.; LIMA, A. A.; SILVA, F. E. O. **Modelo Rio Grande de simulação hidrológica para previsão de vazões de curto prazo: formulação teórica**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2002. 75 p. (Relatório Técnico Parcial 2).
- NIJSSEM, B.; LETTENMAIER, D. P.; LIANG, X.; WETZEL, S. W.; WOOD, E. F. Streamflow simulation for continental-scale river basins. **Water Resources Research**, v. 33, n. 4, p. 711-724, 1997.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE – Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente, 1979. 421 p.
- PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias: estudo de caso: bacia do Rio Solimões**, 2009. 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18927>>. Acesso em: 10 set. 2011
- PINHEIRO, V. B.; NAGHETTINI, M. Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 2, p. 143-156, 2010.
- PISSARRA, T. C. T. **Avaliação quantitativa das características geomorfológicas de microbacias hidrográficas 1ª ordem de magnitude em quatro posições do sistema natural de drenagem**. 1998. 124 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 1998. 124 p.
- POLITANO, W. **Estudo da adequabilidade do emprego de bacias hidrográficas de 3ª, 2ª, 1ª ordem de magnitude na análise morfométrica aplicada a solos**. 1992. 331 p. Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 1992.
- QUEIROGA, Y. G. A. **Estudo e modelagem dos erros de simulação hidrológica e sua assimilação na previsão de vazões de curto prazo: o caso da bacia do rio Grande na UHE Camargos**. 2003. 348 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2003. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/dissertacao_yuri.pdf>. Acesso em: 22 out. 2011.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, V. J. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental: métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. (Relatório Técnico Parcial).

- RIBEIRO NETO, A. **Simulação hidrológica na Amazônia**: Rio Madeira. 2006. 195 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2006.
- SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. In: CONGRESSO NACIONAL DE TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, 12., 2006, Granada, Espanha. **Anais...** Granada, 2006. p. 465-479.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. cap. 2, p. 35-51.
- SOARES, J. V. **Curso de introdução à hidrologia florestal**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas especiais – INPE. 2000. 78 p.
- SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. Áreas hidrológicamente sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do rio Barigui, PR, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 5, p. 61-76, 2010.
- SUI, D. Z.; MAGGIO, R. C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 23, p. 35-51, 1999.
- TSOU, M. S.; WHITTEMORE, D. O. User interface for ground-water modeling: ArcView extension. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 6, n. 3, p. 251-257, 2001.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.
- WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. **Rainfall-runoff modeling in gauged and ungauged catchments**. Londres: Imperial College Press, 2004. 306 p.
- XAVIER, M. C. R. **Estudo da distribuição espacial de vazões na gestão dos recursos hídricos**. 2007. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2007.
- YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista de Administração Pública**, v. 27, n. 2, p. 5-18, 1993.