



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciência

Faculdade de Engenharia

Ernani Bellon

**Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas:
aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental
na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro**

Rio de Janeiro

2014

Ernani Bellon

**Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas:
aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental
na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental – Gestão Sustentável de Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Luciene Pimentel da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Marconi Fonseca de Moraes

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B447 Bellon, Ernani.

Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro / Ernani Bellon. - 2014. 110 f.

Orientadora: Luciene Pimentel da Silva.

Coorientador: Marconi Fonseca de Moraes

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Recursos hídricos – Dissertações. 3. Rio de Janeiro (Brasil) – Dissertações. I. Silva, Luciene Pimentel da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 556.18(815.3)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Ernani Bellon

**Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas:
aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental
na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental – Gestão Sustentável de Recursos Hídricos.

Aprovado em: 25 de março de 2014.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Luciene Pimentel da Silva (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Marconi Fonseca de Moraes (Coorientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof.^a Dr.^a Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora
Universidade Federal Fluminense – UFF

Rio de Janeiro

2014

DEDICATÓRIA

Aos meus tios-avós, Eduardo e Yolanda, *in memoriam*.

Aos meus filhos, Eduardo e Luiza.

AGRADECIMENTOS

À professora Luciene Pimentel da Silva, minha orientadora, por ter me dedicado parte do seu precioso tempo e conhecimento, e com enorme paciência me incentivou à realização desta pesquisa.

Ao professor Marconi Fonseca de Moraes, meu coorientador, que implantou e operou as estações hidrometeorológicas na microbacia experimental de Santa Maria e Cambiocó cujos dados serviram ao presente estudo.

Aos professores Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora e Alfredo Akira Ohnuma Júnior, por terem aceitado participar da banca examinadora e me honrado com suas contribuições valiosas.

Às instituições, pesquisadores e técnicos que participaram do Projeto Gestão Participativa da Sub-bacia do Rio São Domingos, pela concessão dos dados que serviram ao presente estudo. Em especial, à Embrapa Solos e Marta Vasconcelos Ottoni.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, pelos dados climatológicos cedidos e aqueles consultados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

Aos professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UERJ, pela convivência fraterna durante a realização do curso.

Ao Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, pela oportunidade de cursar o mestrado do PEAMB.

RESUMO

BELLON, Ernani. *Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro*. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

A degradação ambiental do Noroeste do Estado do Rio de Janeiro tem se intensificado nas últimas décadas devido às práticas agrícolas não preservacionistas. Esta situação, que decorre do uso inadequado do solo, tem implicado em mudanças na oferta hídrica em grau variável nos municípios da região com prejuízos econômicos nas atividades dos pequenos e médios proprietários rurais e na qualidade de vida. A abordagem para enfrentar problemas deste tipo depende da participação efetiva das instâncias de governo e dos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos. No âmbito da hidrologia os modelos hidrológicos com base no uso e ocupação do solo são ferramentas que podem auxiliar com ótimo custo e benefício a geração de informações em bacias hidrográficas, instrumentadas ou não. Os modelos são úteis ao planejamento e à tomada de decisão por possibilitarem a previsão de vazões e simulação de cenários sobre o uso do solo e qualidade da água. Neste sentido, o presente estudo pretende dar sua contribuição ao avaliar a adequabilidade do modelo SWAT simular o processo chuva-vazão na microbacia experimental de Santa Maria e Cambiocó, com 13,5 km², localizada na região hidrográfica do rio Muriaé, afluente do rio Paraíba do Sul. O SWAT tem sido empregado em bacias agrícolas nos EUA, na Europa e, atualmente, na China, sudeste asiático e Irã, entre outros países, e na última década maior inserção no meio acadêmico brasileiro. A versão 2005 do modelo foi utilizada por meio da sua interface SIG para simular as vazões médias diárias com base na precipitação medida no intervalo de 15 minutos no período de 2005/2006. As vazões simuladas foram comparadas com as vazões observadas no exutório da microbacia. Foram testadas as ferramentas de análise de sensibilidade e autocalibração. O método de calibração manual foi usado para o ajuste por tentativa e erro. Os parâmetros ajustados corresponderam ao CN2 e ESCO. Os valores obtidos na calibração para os coeficientes estatísticos R², NSE, PBIAS e RSR foram 0,80, 0,80, 7,02 e 0,45, respectivamente, indicando escore “muito bom”, o que foi confirmado pela inspeção dos hidrogramas. As saídas validadas para período diferente da calibração forneceram para os mesmos coeficientes os valores 0,84, 0,80, 25,92 e 0,44. Os dois primeiros, com escore “muito bom”. O valor de PBIAS, no limite do satisfatório, e RSR, “muito bom”. O desempenho permitiu concluir que a simulação com o SWAT foi adequada. Em relação às pesquisas que têm sido realizadas no Brasil os valores obtidos para os indicadores foram semelhantes, indicando a capacidade do modelo para novos estudos nesta microbacia que considerem os usos consuntivos e cenários de uso do solo.

Palavras-chave: Modelo SWAT; Microbacia experimental; Gestão dos recursos hídricos.

ABSTRACT

BELLON, Ernani. *Water resources planning of degraded rural areas: application of the SWAT model in an experimental catchment in the Northwest region of the State of Rio de Janeiro*. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

The environmental degradation in the Northwest region of the State of Rio de Janeiro has intensified in the last decades due to no preservationist agricultural practices. This arises from inappropriate land use that has been associated to changes in water supply to a varying extent in the Region's municipalities. These, has led to economic losses in the activities of small and medium rural homeowners, and quality of life decaying. The approach to address such problems depends on the active participation of government bodies and agencies responsible for water resources management. Hydrological simulation models can assist with great value and benefit to the generation of information in basins, instrumented or not. Models are useful for planning and decision making as they allow the discharges forecasting and simulation scenarios on land use and water quality. In this context, the study aims to make a contribution to assess the suitability of the rainfall-runoff component of the SWAT model in the Santa Maria and Cambiocó catchment, with 13.5 km², located in Muriaé's river basin, a tributary of the Paraíba do Sul's river basin. SWAT has been employed in agricultural basins in the U.S., Europe, and currently in China, Southeast Asia and Iran, among other countries, and had in the last decade greater insertion in the Brazilian academia. The 2005 version of the model was used through its GIS interface to simulate the daily mean discharges based on rainfall measured at 15 minute intervals from 2005/2006. Simulated and observed discharges at catchment's outlet gage station have been compared. Tools for sensitivity analysis and calibration were tested. Manual calibration adjustment was conducted with CN2 and ESCO parameters. The values obtained by calibration for the statistical coefficients R², NSE, PBIAS and RSR were 0.80, 0.80, 7.02 and 0.45, respectively, indicating "very good" score. This was confirmed by inspection of hydrographs. The validation period for the different outputs provided the coefficients 0.84, 0.80, 25.92 and 0.44. The R² and NSE matched a "very good" score. The PBIAS was at the limit of satisfactory and RSR, "very good". The results showed that SWAT simulations were appropriate comparing with others studies in Brazil. The model can be recommended for further studies in this catchment for modeling consumptive uses and land use scenarios.

Keywords: SWAT model; Experimental microwatershed; Water management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico no SWAT	44
Figura 2 - Localização da microbacia experimental de Santa Maria e Cambiocó	57
Figura 3 - Vistas da microbacia em Santa Maria e Cambiocó	58
Figura 4 - Comunidades de Santa Maria e Cambiocó	59
Figura 5 - Comandos do SWAT2005 e etapas do projeto	63
Figura 6 - Relevo e classes de declividades na microbacia	65
Figura 7 - Distribuição dos Solos / URHs na microbacia	67
Figura 8 - Hidrogramas observado/simulado (1ª simulação)	71
Figura 9 - Hidrograma do escoamento de base simulado (1ª simulação)	71
Figura 10 - Ranqueamento dos parâmetros com base na função objetivo SSQ	74
Figura 11 - Ranqueamento dos parâmetros com base na função objetivo SSQR	74
Figura 12 - Ranqueamento dos parâmetros com base na vazão média simulada	75
Figura 13 - Hidrogramas observado/simulado com a função SSQ (autocalibração)	77
Figura 14 - Hidrogramas observado/simulado com a função SSQR (autocalibração)	77
Figura 15 - Hidrogramas observado/simulado (calibração)	81
Figura 16 - Hidrograma do escoamento de base simulado (calibração)	81
Figura 17 - Dispersão das vazões diárias observadas/simuladas (calibração)	82
Figura 18 - Dispersão dos resíduos entre as vazões diárias observadas/simuladas normalizados pela média das vazões diárias observadas (calibração)	83
Figura 19 - Hidrogramas observado/simulado no período a validar (antes da validação) .	85
Figura 20 - Hidrogramas observado/simulado (validação)	86
Figura 21 - Hidrograma do escoamento de base simulado (validação)	87
Figura 22 - Dispersão das vazões diárias observadas/simuladas (validação)	87
Figura 23 - Dispersão dos resíduos entre as vazões diárias observadas/simuladas normalizados pela média das vazões diárias observadas (validação)	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores usados na avaliação de simulações hidrológicas	32
Tabela 2 - Classificação das simulações hidrológicas	33
Tabela 3 - Modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água	40
Tabela 4 - SWAT no Brasil em bacias menores do que 100 km ² (2003-2010)	56
Tabela 5 - Resultados da 1ª simulação (antes da calibração)	70
Tabela 6 - Parâmetros que influenciam o processo chuva-vazão disponíveis na análise de sensibilidade do SWAT2005	72
Tabela 7 - Resultados da autocalibração com as funções objetivo SSQ e SSQR	77
Tabela 8 - Resultados da calibração do parâmetro CN2	79
Tabela 9 - Resultados da calibração do parâmetro ESCO (com “CN2 = 80”)	80
Tabela 10 - Resultados da simulação do período a ser validado (antes da validação)	85
Tabela 11 - Resultados da validação com “CN2 = 80” e “ESCO = 0,4”	86
Tabela 12 - Resultados das etapas de calibração e validação	89
Tabela 13 - Comparação com o estudo de Andrade (2011)	91
Tabela 14 - Parâmetros de crescimento de vegetação (pastagem) fornecidos pelo <i>Land cover/Plant Growth database</i>	106
Tabela 15 - Parâmetros físico-hídricos dos solos inseridos no <i>User soils database</i>	107
Tabela 16 - Dados do gerador climático inseridos no <i>User weather stations database</i> ..	108
Tabela 17 - Parâmetros do <i>input file</i> “unidade de resposta hidrológica” (.hru)	109
Tabela 18 - Parâmetros do <i>input file</i> “água subterrânea” (.gw)	109
Tabela 19 - Parâmetros do <i>input file</i> “manejo do solo” (.mgt)	109
Tabela 20 - Parâmetros do <i>input file</i> “canal principal” (.rte)	109
Tabela 21 - Parâmetros do <i>input file</i> “sub-bacia” (.sub)	110
Tabela 22 - Parâmetros do <i>input file</i> “bacia hidrográfica” (.bsn)	110
Tabela 23 - Parâmetros do <i>input file</i> “configurações e opções de modelagem” (file.cio) ..	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
AnnAGNPS	<i>Annualized Agricultural Non-point Source</i>
ANSEWRS	<i>Area Non-point Source Watershed Environment Response Simulation</i>
ArcGIS	Software de Sistemas de Informações Geográficas da ESRI
ArcMap	Aplicativo do ArcGIS
ArcSWAT	Extensão SWAT para o ArcGIS
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BLAI	Índice do potencial máximo de área foliar
CC	Capacidade de Campo
CEIVAP	Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CH_K2	Condutividade efetiva do canal principal
CH_N2	Coeficiente de Manning do canal principal
CN	Curva Número
CN1	Curva Número para a condição I de umidade (solos secos)
CN2	Curva Número para a condição de umidade II (solos na CC)
CN3	Curva Número para a condição de umidade III (solos saturados)
CNOP	Curva Número (quando ocorre operação de manejo)
COPPE/UFRJ	Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia Politécnica
CREAMS	<i>Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management</i>
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio de Janeiro
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPCO	Fator de compensação da remoção de água pelas raízes
EPIC	<i>Environmental Impact Policy Climate</i>
ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
GEPARMBH	Projeto Gestão Participativa da Sub-Bacia do Rio São Domingos
GLEAMS	<i>Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems</i>
GRASS	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
GRHIP/UERJ	Grupo de Estudos de Hidrologia e Planejamento de Recursos Hídricos
GW_REVAP	Coeficiente de retorno da água para a zona não saturada
GWQMN	Profundidade mínima do aquífero raso para ocorrer o escoamento de base
HSPF	<i>Hydrological Simulation Program – FORTRAN</i>
HRU	<i>Hydrologic Response Unit</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LH	<i>Latin Hypercube</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
NSE	Coeficiente de Nash & Sutcliffe
OAT	<i>One-factor-At-a-Time</i>
OV_N	Coeficiente de Manning para o fluxo superficial

PARASOL	<i>Parameter Solutions</i>
PBIAS	Percentual de tendência bias
PRMS	<i>Precipitation-Runoff Modeling System</i>
R ²	Coeficiente de Determinação
RCHRG_DP	Fração de água que percola para o aquífero profundo
REVAPMN	Profundidade mínima do aquífero raso para ocorrer “revap”
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
ROTO	<i>Routing Outputs to Outlet</i>
RSR	Razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações
SCFH	Sistema de Classificação Físico-Hídrica
SEAAPI	Secretaria de Estado de Agricultura, Abastecimento, Pesca e Desenvolvimento do Interior do Estado do Rio de Janeiro
SHE	Sistema Hidrológico Europeu
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
SOL_Z	Profundidade da camada do solo
SSQ	Soma dos Quadrados dos Resíduos
SSQR	Soma dos Quadrados das Diferenças dos Resíduos Ranqueados
SURLAG	Coeficiente que controla o atraso do escoamento superficial
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWRRB	<i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i>
TR-55	<i>Technical Release 55</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	13
	Problemática e justificativa	13
	Objetivos geral e específicos	17
	Estrutura da dissertação	17
1	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	18
1.1	Sistemas e modelos	19
1.2	Classificação dos modelos hidrológicos	20
1.3	Evolução dos modelos hidrológicos	21
1.4	Modelagem hidrológica	22
1.4.1	<u>Escolha do modelo</u>	23
1.4.2	<u>Bacia hidrográfica</u>	25
1.4.3	<u>Definição dos dados</u>	27
1.4.3.1	Variáveis hidrometeorológicas	27
1.4.3.2	Parâmetros físicos	29
1.4.3.3	Ajustes dos parâmetros	29
1.4.4	<u>Avaliação do desempenho</u>	31
1.4.5	<u>Análise de incertezas</u>	34
1.5	Sistemas de Informações Geográficas	36
1.6	Modelos hidrológicos de base física	39
1.7	Sistema hidrológico SWAT	41
1.7.1	<u>Descrição do SWAT2005</u>	43
1.7.1.1	Aspectos conceituais	43
1.7.1.2	Planos de informação	46
1.7.1.3	Dados de entrada	48
1.7.1.4	Parametrização	50
1.7.1.5	Edição	51
1.7.1.6	Simulação	51
1.7.1.7	Análise de sensibilidade e calibração	51
1.7.2	<u>Aplicações do SWAT</u>	53
1.7.3.	<u>SWAT no Brasil</u>	55

2	METODOLOGIA	57
2.1	Caracterização da área de estudo	57
2.1.1	<u>Localização geográfica</u>	57
2.1.2	<u>Aspectos gerais</u>	58
2.1.3	<u>Aspectos socioeconômicos</u>	59
2.1.4	<u>Solos da microbacia</u>	61
2.1.5	<u>Estudo hidrológico da microbacia</u>	62
2.2	Desenvolvimento do projeto	62
2.2.1	<u>Instalação da interface</u>	63
2.2.2	<u>Criação do projeto SWAT2005</u>	64
2.2.3	<u>Delineamento da microbacia</u>	64
2.2.4	<u>Reclassificação e definição das URHs</u>	65
2.2.5	<u>Dados climáticos e parametrização</u>	68
2.2.6	<u>Edição dos dados</u>	69
3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
3.1	Primeira simulação	70
3.2	Análise de sensibilidade	72
3.3	Autocalibração	76
3.4	Calibração manual	78
3.5	Validação	84
3.6	Análise dos resultados	89
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ...	92
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – Descrição dos processos hidrológicos do SWAT	102
	APÊNDICE B – Dados da cobertura vegetal da microbacia	106
	APÊNDICE C – Dados dos solos da microbacia	107
	APÊNDICE D – Dados do gerador de clima da microbacia	108
	APÊNDICE E – Demais parâmetros da microbacia	109

INTRODUÇÃO

Problemática e justificativa

O entendimento de que a água é um bem abundante e ilimitado não é mais aceito. Nos dias atuais há uma conscientização crescente de que as atividades humanas causam impacto no meio ambiente muitas vezes de difícil superação. Entre os exemplos estão as mudanças provocadas pelas práticas agrícolas que envolvem o desmatamento e muitas vezes não levam em consideração o uso racional e conservacionista da água. Em consequência, o processo natural de armazenamento da água no solo e recarga dos aquíferos é incapaz de restabelecer seu equilíbrio quantitativo e qualitativo.

O Brasil possui uma das maiores reservas de água doce do planeta. Em algumas regiões com excelentes níveis de precipitação anual. No entanto, defronta-se com distribuição espacial e temporal não uniforme das chuvas, anomalias e variabilidade natural climática, e situações de risco quanto à disponibilidade dos recursos hídricos intrínsecas aos sistemas naturais. Além das áreas originalmente semiáridas da região Nordeste, aquelas onde a água é abundante têm estado também sujeitas às perdas das características naturais pela ocupação irregular e uso inadequado do solo com atividades que alteram a quantidade e qualidade das águas (ANA, 2007).

Nas áreas rurais o impacto das práticas não conservacionistas do solo implicam na escassez e desabastecimento para os usos consuntivos. Este problema deve ser enfrentado e resolvido de maneira integrada nos níveis local e regional. A abordagem precisa ser multissetorial com foco no monitoramento do sistema hidrológico, avaliação e controle contínuo, frente às demandas humanas, de maneira que ações de curto e médio prazo pelas instâncias de governo não tenham caráter somente mitigador. As soluções devem ser coordenadas e baseadas em políticas efetivas em busca do desenvolvimento sustentável.

O aproveitamento dos recursos hídricos depende da priorização de ações públicas com foco em considerações de caráter legal, político, ambiental, social e econômico. No Brasil, a Lei nº 9.433/97 (Lei das Águas), alterou o arcabouço para gestão desses recursos, tratando a questão de maneira mais específica e sensível ao ciclo hidrológico em relação aos espaços atuais de atuação governamental com suas divisões administrativas e políticas, tendo a bacia hidrográfica como unidade fundamental de estudos multissetoriais. Além disso, impôs a participação do setor produtivo e da sociedade nas discussões e decisões colegiadas.

Na bacia hidrográfica o monitoramento hidrometeorológico e o estudo hidrológico servem para subsidiar a aplicação de instrumentos de outorga e cobrança pelo uso da água, bem como a definição de ações para sua proteção e conservação. Em países de grandes dimensões os estudos para serem eficazes devem visar às questões locais, voltadas para bacias menores, uma vez que as informações neste nível, mais próximas da realidade administrativa municipal, são importantes para o conhecimento da dinâmica hidrológica do sistema hidrográfico regional.

Na presente dissertação o problema a ser investigado relaciona-se ao Noroeste Fluminense. A região com cerca de 310 mil habitantes é de grande interesse para o Estado do Rio de Janeiro por sua localização no trecho baixo do rio Paraíba do Sul, onde este sistema hidrográfico agrega a influência de centenas de quilômetros do que ocorre a montante. Nela as atividades agrícolas e pecuárias nas áreas rurais geram impactos locais com reflexos na extensão restante do rio Paraíba do Sul.

A história do Noroeste Fluminense foi marcada principalmente pelos ciclos agrícolas do café e açúcar que nela se instalaram ao longo dos anos à custa da madeira para construção e produção de energia, promovendo um intenso desmatamento. Atualmente, restam menos de 5% da cobertura original, representada por bolsões isolados de vegetação secundária e de remanescentes da mata atlântica com predomínio de pastagens. Os usos não conservacionistas na agricultura e pecuária são recorrentes e responsáveis pela erosão do solo, assoreamento e eutrofização dos cursos d'água, desaparecimento/migração de nascentes e contaminação dos solos/aquíferos. Tais práticas têm agravado a situação de oferta hídrica entre seus usuários (GEPARMBH, 2003).

Se a degradação ambiental persistir na região Noroeste Fluminense a escassez de água nos próximos anos poderá ter sérias implicações sociais. Vale ressaltar que a disponibilidade hídrica já é uma vulnerabilidade real. Nos períodos com menores níveis de precipitação a água é represada nos córregos para irrigação das culturas de inverno, contribuindo com aumento das taxas de evaporação e diminuição da oferta para consumo humano e animal. A situação se agrava com as atividades agrícolas sem técnicas condizentes de manejo do solo. Do ponto de vista econômico as demandas criam conflitos pelo uso da água, baixa produtividade e custos elevados de cultivo, resultando na falta de oportunidades para as comunidades, baixa qualidade de vida e migração para centros urbanos (GONÇALVES; FIDALGO; BASTOS, 2006; MARTORANO et al., 2003).

As questões ambientais e socioeconômicas do Noroeste Fluminense têm sido motivo de preocupação dos órgãos responsáveis pela gestão territorial no Estado do Rio de Janeiro. Entre as iniciativas ressalta-se em 2003-2005 o projeto “Gestão Participativa da Sub-bacia do Rio São Domingos” (GEPARMBH), que reuniu a Embrapa Solos, COPPE e Politécnica da UFRJ, EMATER, CEIVAP, UERJ e SEAAPI. Nessa ocasião a sub-bacia do rio São Domingos, inserida na bacia hidrográfica do rio Muriaé, importante afluente do rio Paraíba do Sul, foi escolhida como representativa para realização de estudos socioeconômicos e do meio físico-ambiental, de caráter multidisciplinar e interinstitucional, que tiveram como base metodologias integradoras e participativas com envolvimento das comunidades locais. Uma característica relevante da área de drenagem do rio São Domingos é sua quase coincidência com o limite municipal de São José de Ubá. Os estudos visaram sensibilizar a gestão municipal para questões que dessem sustentabilidade às ações futuras de gestão (GEPARMBH, 2003).

O GRHIP/UERJ, associado ao GEPARMBH, concentrou esforços nas vilas de Santa Maria e Cambiocó do município de São José de Ubá, que se tornaram “comunidades piloto” do projeto, entre outras estudadas, realizando monitoramento e estudos hidrológicos na microbacia dos córregos de Santa Maria e Cambiocó. A escolha da microbacia teve como critério possuir boa organização sociopolítica entre os moradores e como base da sua economia o cultivo de tomate, o que significava um grande potencial em consumo da reserva hídrica local na irrigação. Do ponto de vista dos impactos socioeconômicos a escolha considerou a importância dos conflitos pelo uso da água entre os agricultores e demais usos (humano e dessedentação), o aumento dos custos de manutenção da infraestrutura de produção, inclusive com os solos, e a diminuição da qualidade de vida nas comunidades (MORAES, 2007).

Entre os resultados alcançados pelo GEPARMBH destacam-se na microbacia experimental e representativa de Santa Maria e Cambiocó: (i) o levantamento dos solos e sua classificação pela Embrapa Solos, (ii) o estudo realizado por Ottoni (2005) com proposta de classificação físico-hídrica dos solos, e (iii) o estudo de Moraes (2007) sobre o balanço hídrico e estimativa hídrica mensal com implantação e operação do monitoramento meteorológico e hidrossedimentológico.

Vale ressaltar que iniciativas como a do GEPARMBH justificam a importância do uso da bacia hidrográfica como unidade de pesquisa para gestão dos recursos hídricos. Nela, os estudos físico-ambientais podem ser conduzidos de inúmeras maneiras. No caso dos modelos hidrológicos as interações extremamente complexas dos processos físicos nos meios

atmosférico e terrestre podem ser representadas e simuladas considerando cenários e previsão de vazões, úteis ao planejamento e à tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos. Os modelos ao serem associados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), programas computacionais projetados para lidar com dados referenciados por coordenadas espaciais ou geográficas, oferecem uma maneira eficaz para investigar, monitorar e analisar os processos naturais e interferências humanas no âmbito da bacia. Nos modelos de base física e de qualidade da água a simulação dos processos amplia a capacidade de estimar e avaliar as consequências das ações antrópicas.

A opção pelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) deve-se ao interesse que este modelo hidrológico passou a ter nos últimos anos no meio acadêmico brasileiro em bacias agrícolas do Sul e Sudeste, em aplicações voltadas para previsão de vazões e avaliação do impacto do uso do solo nos processos erosivos e qualidade da água. O modelo tem como principais características avaliar os impactos de longo prazo em bacias, instrumentadas ou não, requerendo uma base de dados mínima para operar computacionalmente de maneira eficiente. O acoplamento da interface SIG torna fácil a implementação da modelagem hidrológica com relação às entradas, execução e apresentação dos resultados. O SIG tem a função de capturar os dados geográficos, climatológicos, pedológicos e de manejo do solo, tornando transparentes os procedimentos de implantação, desenvolvimento e execução do modelo. O SWAT é uma referência mundial, tendo amplo rol de aplicações nos cinco continentes, principalmente nos EUA onde foi desenvolvido, na Europa e, mais recentemente na Ásia, em países como China e Irã. O modelo está em constante aperfeiçoamento. Além disso, por sua flexibilidade é uma excelente ferramenta para fornecer subsídios aos órgãos de gestão territorial e de recursos hídricos (GARBOSSA et al., 2011; GASSMAN et al., 2007; GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014).

A premissa para o desenvolvimento da presente pesquisa baseia-se na comparação das vazões médias diárias simuladas pelo SWAT com as observadas na microbacia experimental, considerando a aderência das recessões e picos dos hidrogramas, e avaliação do seu desempenho por meio de indicadores estatísticos de eficiência e da verificação do balanço hídrico. No caso da hipótese ser atendida o modelo pode ser proposto para novas aplicações nesta microbacia e na região Noroeste Fluminense, sobretudo como apoio ao planejamento de recursos hídricos.

Objetivos geral e específicos

O presente estudo teve como objetivo geral avaliar com o sistema hidrológico computacional SWAT a simulação diária do processo chuva-vazão na microbacia experimental e representativa de Santa Maria e Cambiocó, localizada na região Noroeste Fluminense, no contexto do planejamento de recursos hídricos.

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- a) Reunir os dados fisiográficos, de solos e meteorológicos para criação da base de dados necessária ao desenvolvimento do modelo e sua execução;
- b) Utilizar a ferramenta de análise de sensibilidade fornecida pelo modelo para verificar o grau de sensibilidade do conjunto de parâmetros disponíveis que influenciam as respostas de vazão na microbacia;
- c) Utilizar a ferramenta de autocalibração fornecida pelo modelo para obter o melhor ajuste com base no conjunto de parâmetros disponíveis que influenciam as respostas de vazão na microbacia;
- d) Avaliar os resultados obtidos em todas as etapas das simulações, incluindo a calibração e validação, com base na análise dos hidrogramas, balanço hídrico e indicadores estatísticos de eficiência.

Estrutura da dissertação

A fundamentação teórica apresentada no **Capítulo 1** identifica os principais conceitos relacionados com os modelos hidrológicos e questões relacionadas à aquisição e uso dos dados, ajustes de parâmetros e avaliação dos resultados.

O **Capítulo 2** apresenta a metodologia, incluindo a caracterização da área de estudo, preparo de toda base de dados do modelo e sua execução.

Os resultados e discussões sobre análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo são apresentados no **Capítulo 3**, com destaque para tabelas, hidrogramas e gráficos que permitiram a avaliação dos resultados.

No último capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para realização de novos estudos.

1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

A técnica de simulação hidrológica permite emular virtualmente, com aplicação de um modelo matemático e cálculos baseados no balanço hídrico, os processos que ocorrem na fase terrestre do ciclo hidrológico e suas interações com outros elementos associados à circulação da água na natureza, como precipitação, interceptação, evaporação, infiltração, escoamento superficial, lateral e subterrâneo, armazenamento e transporte de massas.

Tucci (1998) ressalta que dentro do escopo da hidrologia os modelos hidrológicos desenvolveram-se continuamente com vários objetivos, entre os quais, os esforços dos pesquisadores para incorporar na modelagem hidrológica metodologias matemáticas e estatísticas na representação dos processos responsáveis pelas trocas de massa e energia que resultam nas constantes alterações da bacia hidrográfica para melhor compreensão dos sistemas hidrológicos. O uso dos modelos contempla diversos aspectos sobre o gerenciamento dos recursos hídricos em aplicações voltadas para energia, desenvolvimento urbano, agricultura e controle ambiental.

Os modelos hidrológicos fornecem informações importantes, como: (i) hidrograma para análise do comportamento hidrológico, (ii) simulação das vazões com dados de chuva em determinado período, (iii) ampliação das séries históricas das vazões previstas, tendo como dados de entrada séries mais longas de precipitação, (iv) regionalização das vazões ou parâmetros do modelo para bacias que não possuem registros fluviométricos, (v) estimativa do balanço hídrico, (vi) previsão das vazões desconhecidas a partir da definição de cenários de uso e ocupação dos solos, e (vii) estimativa das cargas de sedimentos e poluentes (pontuais e difusas).

As informações geradas pelos modelos hidrológicos podem ser usadas complementarmente nos estudos multidisciplinares como instrumentos para cumprimento de metas ambientais e gerar modelos simplificados como ferramenta regionalizada para auxiliar os tomadores de decisão (VELEDA, 2006).

Em razão da complexidade dos fenômenos ambientais os modelos hidrológicos possuem vantagens, como facilidade de execução, baixo custo e rápida obtenção dos resultados. Esta condição permite a simulação de cenários integrados inviáveis de representação de outra maneira. No entanto, apesar da sua importância em aplicações de recursos hídricos e gestão ambiental, os modelos não são muito usados na área governamental no Brasil (KOBAYAMA et al., 2004).

Rennó e Soares (2000) consideram que os modelos hidrológicos são ferramentas capazes de antecipar acontecimentos e apontar alternativas para a manutenção da capacidade produtiva do ambiente. Os modelos são importantes para auxiliar nos estudos sobre o impacto das mudanças do uso do solo e na previsão das alterações futuras dos ecossistemas.

1.1 Sistemas e modelos

O uso de modelos hidrológicos requer que alguns conceitos relacionados a sistemas e modelos sejam entendidos. Sistema é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e com uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação. Modelo é uma representação do comportamento do sistema, numa linguagem ou maneira de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. A modelagem permite compreender o sistema e prever situações de cenários futuros para direcionar as ações decisórias (TUCCI, 1998).

A seguir estão relacionados conceitos importantes para a compreensão do significado de sistemas e modelos:

- a) *Fenômeno* – processo que produz alteração de estado no sistema, em razão das trocas de massa e energia responsáveis pelas constantes alterações das suas variáveis e parâmetros. Exemplos: precipitação, evaporação e infiltração.
- b) *Variável* – valor que descreve quantitativamente um fenômeno. As variáveis podem mudar ao longo do tempo em que o modelo estiver sendo executado. Em um modelo podem ser distinguidos três tipos de variáveis: (i) de estado (ex.: conteúdo de água no solo), (ii) processo ou fluxo (ex.: taxa de infiltração), e (iii) forçante ou impulsionadora (ex.: chuva, como fluxo; aquífero, como estoque; vento, como modulador).
- c) *Parâmetro* – valor que caracteriza o sistema, podendo variar espacialmente, mas que permanece inalterado para todos os intervalos de tempo. Exemplos: características físicas dos solos, declividade do leito fluvial etc.

1.2 Classificação dos modelos hidrológicos

Nas últimas décadas muitos modelos hidrológicos de simulação têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados com base em conceitos importantes que os caracterizam, resultando em diferentes classificações. Entre as definições destacam-se as apresentadas por Tucci (1998), relacionadas com os aspectos que as variáveis podem assumir na modelagem.

Se pelo menos uma das variáveis na modelagem tem o comportamento aleatório os modelos são ditos *estocásticos*, sendo estatístico o relacionamento entre entrada e saída do sistema. Se os conceitos de probabilidade não são considerados os modelos denominam-se *determinísticos*. Neste caso, cada valor de entrada produz um único valor de saída.

Os *modelos empíricos* são os que a relação entre as variáveis do sistema se dá pelas observações, sem estarem associados necessariamente a uma lei física genérica para qualquer lugar ou situação. São representados em termos das funções empíricas ou correlativas baseadas em análises estatísticas representadas por equações matemáticas. A formulação das relações entre variáveis e parâmetros usam os dados circunstanciais. Em geral os processos físicos não são considerados.

Os *modelos conceituais* dependem de um entendimento maior do sistema. As funções usadas na sua representação consideram os processos físicos que os descrevem por meio da representação de variáveis de estado e parâmetros de natureza espacial e temporal. Os valores dos parâmetros são determinados com base em dados históricos, tentativas, ajustes ou amostragem. Podem ser *semiconceituais*, se mantêm um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, e *físicos*, se utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para representar os processos.

Na maioria das vezes com relação à escala temporal as aplicações dependem de alguma discretização dos fenômenos. Quanto menor o intervalo maior a precisão e “custo” computacional para geração dos resultados. Se a saída de uma iteração serve como entrada para uma subsequente e, assim por diante, o modelo pode ser classificado como *dinâmico*.

Os *modelos concentrados ou agregados* não levam em conta a variabilidade espacial dos fenômenos. As variáveis e parâmetros são dependentes somente da escala de tempo (contínua ou discreta) e dos seus valores médios para toda a área estudada, sejam elas de entrada ou saída. Portanto, a heterogeneidade espacial no domínio da modelagem não é considerada. Os processos são representados por equações ordinárias com uma variável independente.

Nos *modelos distribuídos* as variáveis e parâmetros dependem que o espaço e/ou tempo sejam discretizados para representar a devida variabilidade dos fenômenos e processos. Dentro de cada unidade elementar (células), correspondente a elementos quadráticos do espaço, o processo é simulado e os resultados obtidos correspondem às características homogêneas para as variáveis e parâmetros. São representados por equações diferenciais parciais com mais de uma variável independente.

Na prática, constitui uma dificuldade intrínseca a representação inteiramente distribuída. Nos *modelos semidistribuídos* a discretização permite agregar no nível de sub-bacias (estas ligadas por uma rede de drenagem) unidades menores que têm características físicas homogêneas, como uso do solo, tipo do solo e declividade. Dessa maneira, outros aspectos como aqueles relacionados com as ações antrópicas podem ser representados de maneira mais apropriada (CUNDERLIK, 2003).

Quanto aos ajustes dos valores simulados aos observados somente os modelos distribuídos permitem estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema hidrológico. As maiores dificuldades devem-se à escassez de dados de entrada, incertezas sobre valores dos parâmetros e manuseio de múltiplas informações sobre o sistema físico-ambiental a ser representado, além de maior esforço computacional.

1.3 Evolução dos modelos hidrológicos

No campo da hidrologia os avanços na representação matemática dos fenômenos hidrológicos permitiram a partir da década de 1930 que estudos quantitativos se tornassem efetivos nas agências governamentais dos EUA e de países europeus. São dessa época o hidrograma unitário usado para o cálculo do escoamento superficial, a fórmula da infiltração, e o modelo de escoamento em rios.

A partir da década de 1950 com o advento do computador as técnicas numéricas e estatísticas passaram a ser usadas de maneira mais eficientes. Os primeiros modelos chuva-vazão foram desenvolvidos para atender aos estudos da hidrologia operacional sobre o aproveitamento do potencial hidráulico das grandes bacias hidrográficas, prevenção de inundações, previsão de afluência da descarga fluvial, dimensionamento e operação hidráulica dos reservatórios. Esses modelos foram formulados com base em funções empíricas e na equação de continuidade para chuva e vazão sem considerar a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros.

Na década de 1960 foram desenvolvidos os primeiros modelos conceituais. Os mais complexos consideravam os parâmetros usados para representar os processos do ciclo hidrológico com base na conservação de massa e podiam ser estimados a partir de relacionamentos gerais, e calculados por meio de ajustes com os dados observados. Os conceituais concentrados representavam os processos hidrológicos por meio de um conjunto de reservatórios, cada qual descrevendo uma parcela do ciclo.

A partir da década de 1980 o enfoque ambiental sobre os modelos hidrológicos tiveram como objetivo desenvolvê-los para serem capazes de representar com maior precisão por meio de equações diferenciais os processos físicos, incorporando a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros, em parte ou mais amplamente, no espaço tridimensional. Além disso, incorporaram o entendimento sobre como os processos interagem nos limites da bacia hidrográfica, quais as suas implicações no funcionamento do balanço hídrico e de que maneira os impactos no uso do solo afetam a quantidade e qualidade da água. O principal exemplo foi o desenvolvimento do Sistema Hidrológico Europeu (SHE), baseado na conservação de massa, energia e momento, para simular o movimento da água na bacia por meio de equações diferenciais parciais de leis físicas que descrevem os vários processos do ciclo hidrológico.

Atualmente, com o intenso desenvolvimento de hardware e dos sistemas computacionais, e possibilidades de apropriação, monitoramento, armazenamento e manipulação das variáveis e parâmetros ambientais, além das novas abordagens para representação dos fenômenos e processos, as pesquisas têm sido orientadas para modelos mais complexos e eficientes para capturar os sistemas físicos ambientais, que são intrinsecamente dinâmicos.

1.4 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica é uma tarefa complexa e sistemática que envolve a escolha do modelo para uma dada aplicação, as características da bacia hidrográfica, a aquisição e qualidade dos dados usados como entradas, a parametrização, as técnicas de ajustes dos parâmetros e de avaliação do desempenho.

1.4.1 Escolha do modelo

A escolha do modelo hidrológico requer atenção para verificação de uma série de critérios. Desde os ditados pela familiarização e preferências do usuário às características da plataforma computacional, recursos e tempo. Além disso, o mais importante é o que se pretende atingir quanto aos resultados, intimamente relacionados com o nível de precisão desejado para representação dos fenômenos hidrológicos. Uma dada aplicação pode demandar que o modelo seja capaz de gerar vazões com certo nível de acurácia ou usado com a finalidade de se definirem cenários quanto ao uso do solo. Em qualquer caso, os modelos de base física dependem de um razoável conhecimento dos aspectos físicos e climatológicos relacionados com a bacia hidrográfica, levando em conta que os dados sejam compatíveis para obtenção dos resultados com a resolução espacial e temporal esperada. Na fase de pré-seleção do modelo deve ser feito um levantamento daqueles que atendam à aplicação de interesse, considerando como critérios de escolha alguns fatores, como escala temporal e espacial, processos que podem ser modelados, custo e tempo para implantação, tempo para adquirir expertise, suporte técnico, documentação, facilidade de uso, sistema operacional usado, vantagens e desvantagens, e referências na literatura (CUNDERLIK, 2003).

A realidade ambiental é complexa e pode ser vista como um agregado de sistemas que interagem entre si. Os processos do ciclo hidrológico fazem parte de um sistema mais amplo, onde acontece a interação da água com a atmosfera e o meio terrestre. A base teórica, constituída por equações matemáticas, variáveis e parâmetros, que os representam, é empregada pelo modelo hidrológico de modo agregado ou distribuído para simular o balanço hídrico entre os vários compartimentos da bacia hidrográfica, inclusive a rede de canais, considerando a vazão, sedimentos e poluentes. Nos estudos hidrológicos a melhor maneira de representar a variabilidade espacial depende do que se pretende quantificar e analisar. Além disso, o objetivo precisa ser condizente com a disponibilidade e qualidade dos dados, escala e resolução espacial. A abordagem mais simples é a representação agregada em que o sistema hidrológico é considerado como uma unidade com propriedades espacialmente homogêneas, o que se reflete sobre os valores assumidos para as variáveis e parâmetros relacionados às funções empíricas e/ou equações diferenciais que os descrevem (RENNÓ; SOARES, 2000).

Os modelos agregados são mais simples e adequados para grandes áreas. Neles, as feições espaciais são representadas com dimensão zero. A bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias caso seja preciso maior detalhamento, constituindo um sistema agregado conectado por ligações que representam os cursos d'água. No entanto, esta representação não é adequada quando se analisam fluxos superficiais e subsuperficiais em que a topografia é o principal fator determinante da distribuição da água na bacia e, conseqüentemente, do transporte dos materiais. Importante ressaltar que a topografia é responsável pelas características que definem como a água se move através da paisagem. Entre tais características estão a definição da cumeada, inclinação do terreno, comprimento da rampa, forma do declive, orientação das vertentes, forma/constituição dos canais de drenagem, e conexões entre áreas. Todos os aspectos envolvem o conhecimento dos parâmetros e valores de grande importância ao funcionamento dos modelos (MOORE et al., 1993).

Outra maneira de lidar com o espaço da bacia hidrográfica é discretizando-o. Caso em que se aplicam os modelos semidistribuídos e distribuídos. Os semidistribuídos requerem menos dados de entrada que os distribuídos e permitem, por exemplo, dividir a bacia em unidades menores com características semelhantes em relação às variáveis e parâmetros. Os distribuídos são capazes de maior segmentação da bacia e usam diversos parâmetros associados com as características dos processos físicos. A grande quantidade de dados usados determina mais trabalho na preparação das entradas e mais recursos computacionais para o processamento, como memória e velocidade do processador. Do ponto de vista da modelagem tal abordagem impõe a reunião de informações sobre as várias características da bacia. Nestes modelos as opções de discretização temporal dos processos aproximam o processamento da realidade contínua dos fenômenos naturais (JAJARMIZADEH; HARUN; SALARPOUR, 2012).

Em alguns modelos físico-distribuídos a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias e no nível delas em elementos menores com base nas características homogêneas de cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade. É o caso dos modelos semidistribuídos. Estas unidades definem áreas de comportamentos hidrológicos similares que são computadas matematicamente nos processos que ocorrem na superfície/subsuperfície e no balanço de massa entre os compartimentos ou reservatórios, de maneira que sejam capazes de representar com maior fidelidade o sistema real.

Os modelos hidrológicos físico-distribuídos simulam os processos na bacia hidrográfica com foco nos processos individuais ou em múltiplos processos com discretização espacial e temporal. Dessa maneira, podem apropriar pequenos intervalos de tempo e do espaço ou serem mais simples e genéricos, simulando o comportamento de regiões inteiras e/ou períodos de tempo mais longos (décadas, séculos). No entanto, nem sempre é possível traduzir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia em termos matemáticos. Muitas vezes as relações são extremamente complexas a ponto de não existir formulação matemática capaz de descrevê-las completamente ou apenas uma parte dos processos envolvidos é parcialmente conhecida. Assim, na maioria dos casos a modelagem torna-se somente uma representação aproximada da realidade (DANIEL et al., 2011).

Com relação à escala espacial e temporal relacionadas aos processos hidrológicos o sistema atmosfera-vegetação tem um ciclo de rápida resposta em que a radiação solar atua sobre a circulação de umidade e calor. As interações água-atmosfera-solo-planta (da ordem de segundos) refletem-se no balanço de energia da superfície terrestre, umidade e temperatura do solo, e no comportamento das plantas. O ideal é que os modelos combinem fatores empíricos e teóricos para que a expressão matemática dos processos envolvidos atenda ao nível apropriado de conceituação em que certos parâmetros desempenham papel importante, como condutividade hidráulica do solo e rugosidade do canal de drenagem. Outras questões envolvidas referem-se a como os dados são obtidos, na maior parte das vezes de modo pontual e não espacializado (RENNÓ; SOARES, 2000).

1.4.2 Bacia hidrográfica

É no espaço da bacia hidrográfica que se identifica o limite espacial para o entendimento dos fenômenos relacionados com os processos físicos em que a água interage com a atmosfera-solo-planta, permitindo que os componentes do ciclo hidrológico sejam isolados para compreensão do funcionamento e interação dos mecanismos envolvidos na produção, armazenamento e perda da água dentro do sistema hidrológico. A complexidade da bacia é atribuída a diversos fatores, como localização geográfica e relevo, que determinam os efeitos dos fenômenos climáticos, padrão de drenagem, estrutura/constituição do solo e cobertura/uso do solo. Estas características controlam a quantidade e qualidade da água estocada nos reservatórios, tornando a bacia importante nos estudos voltados à compreensão dos processos físicos.

Percebe-se, quando se consideram a escala de planejamento e as disparidades relacionadas com o nível de conhecimento das bacias hidrográficas e os custos envolvidos, que os esforços de gestão devem ser dirigidos no sentido do estabelecimento de estudos em bacias experimentais. Estas unidades caracterizam-se por serem áreas da ordem de dezenas de km² e funcionam como pequenos laboratórios do mundo real. Os estudos nelas realizados contribuem para compreensão das possíveis alterações no ciclo hidrológico e distribuição espaço-temporal dos recursos hídricos, por causa das mudanças na ocupação e uso do solo, assim como em relação às mudanças climáticas. Adicionalmente, a caracterização física auxilia a aplicação de modelos hidrológicos e climatológicos no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Em muitos casos podem ser provocadas alterações intencionais nas características de cobertura/uso do solo na área da bacia.

As bacias hidrográficas podem ser representativas também da realidade socioeconômica, física e ambiental de uma região com maior abrangência espacial, possibilitando, em princípio, a extrapolação dos conhecimentos adquiridos. No âmbito das agências governamentais a implantação de bacias experimentais e representativas é uma estratégia importante que pode contribuir para simulação de cenários críticos relacionados com a exploração excessiva dos recursos naturais, escassez de água, conflitos pelo uso, degradação ambiental e baixo desenvolvimento, tendo como objetivos o planejamento e gestão dos recursos hídricos para o desenvolvimento sustentável (PIMENTEL DA SILVA; EWEN, 2000).

No caso brasileiro, a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (Lei das Águas), estabeleceu como princípio fundamental de gestão dos recursos hídricos a “bacia hidrográfica”, descentralizada, com a participação do poder público, dos usuários e da comunidade, sendo previstos instrumentos específicos para sua implementação, como planos, cadastros de usuários, outorga e cobrança. As figuras dos comitês e das agências de bacias representam as dimensões política e técnica da gestão que devem orientar e garantir uma atuação multidisciplinar efetiva no estabelecimento e aplicação de políticas públicas voltadas à exploração, preservação e conservação sustentável dos recursos hídricos.

1.4.3 Definição dos dados

A disponibilidade de dados em uma bacia hidrográfica é fundamental para uso dos modelos hidrológicos. As questões relacionadas à aquisição, uso e qualidade dos dados de entrada correspondem a uma etapa da aplicação que deve ser bem cuidada a fim de que se minimizem as incertezas sobre os resultados das simulações. Em termos de custo e benefício os modelos são aplicados com sucesso nos países em que redes de monitoramentos de chuva, vazão e qualidade da água podem ser mantidas permanentemente ou por longos períodos, fornecendo dados de grande importância para gestão de bacias (urbanas e rurais). Atualmente, a aquisição de dados por meio do sensoriamento remoto sobre as variáveis climáticas e características fisiográficas do espaço terrestre ampliam cada vez mais a capacidade de uso dos modelos.

As informações a seguir (1.4.3.1 a 1.4.3.3) sobre variáveis hidrometeorológicas, parâmetros físicos e ajustes de parâmetros foram baseadas em Tucci (1998, 2004).

1.4.3.1 Variáveis hidrometeorológicas

As escalas espacial e temporal na modelagem hidrológica devem ser consideradas em relação aos dados adquiridos e processos analisados. O ideal é que os dados possam ser estimados com base nas medidas de campo e dependam menos das leituras de séries históricas de vazão na fase de ajustes. As séries hidrometeorológicas dependem essencialmente da representatividade dos períodos históricos (secos, úmidos, medianos) e não necessariamente do número de anos de dados. Em séries não estacionárias devem ser mantidos os registros das alterações físicas e dos períodos de ocorrência e do grau de sensibilidade nas respostas. A exatidão das informações é fundamental na qualidade dos resultados da modelagem.

A principal entrada do sistema hidrológico é a precipitação cuja estimativa com maior precisão requer uma densa rede pontual de monitoramentos. O usuário deve ter um bom conhecimento a respeito dos métodos de aquisição, aparelhos, lugares de instalação e informações sobre problemas, como falhas e ausência de registros. A precisão da medição dos dispositivos depende da área de interceptação e do sistema de medição, contínuo ou descontínuo. Os métodos estatísticos podem ser usados para distribuir a chuva espacialmente. Se existe um ou mais postos de controle deve-se buscar relacionar a precipitação e a curva de cada posto a fim de escolher o mais representativo. Se não existem dispositivos automáticos dos registros, as incertezas são altas e a distribuição temporal dentro do dia depende de

metodologias estatísticas de desagregação ou simples ajuste de uma distribuição empírica. Os eventos chuvosos devem ser discretizados com base no tempo de pico do hidrograma, considerando pelo menos um terço do tempo de pico. Se o interesse principal é o de se obterem séries contínuas de volumes de escoamento o intervalo de tempo pode ser maior, uma vez que o modelo deve representar bem a continuidade do volume.

Os dados de evapotranspiração podem ser monitorados ou estimados por meio de variáveis climáticas que permitem o cálculo da evapotranspiração potencial por métodos específicos, como Thornthwaite e Penman. Os postos localizados fora da área de estudo podem ser usados com boa estimativa, em razão de que a variabilidade espacial e temporal desta variável não é tão grande como ocorre com a precipitação, fenômeno eminentemente variável no tempo com intensidade que muda a cada instante no mesmo lugar.

Os dados fluviométricos podem ser monitorados em seções dos rios e no exutório. Além da sua importância intrínseca são usados nos ajustes de parâmetros e validação dos modelos hidrológicos. São muitos os aspectos que devem ser considerados neste tipo de monitoramento, entre os quais a precisão dos equipamentos e o intervalo de monitoramento a fim de diminuir as incertezas. A discretização das vazões é uma escolha importante, porque da mesma maneira que a precipitação sua intensidade é constante dentro do intervalo de tempo. Caso o intervalo seja grande a intensidade diminui. Com a precipitação pequena no intervalo de tempo grande o modelo tende a infiltrar praticamente todo o volume precipitado, criando tendenciosidades nos parâmetros e resultados. Um aspecto importante sobre o monitoramento de vazões é que as medições são demoradas e caras. Uma maneira razoável de obtê-las é pela variação da altura do nível de água (cota) que se altera ao longo do tempo. Dessa maneira, com a medição contínua é possível estabelecer a curva chave (cota x vaza) por meio de métodos teóricos e experimentais. O método automatizado é satisfatório para medir com regularidade os eventos de curta duração especialmente em pequenas bacias. A precisão das medições depende das cotas medidas e do intervalo de tempo de medição.

Os dados de precipitação e vazão consistidos e preparados devem ser analisados sob a ótica do balanço hídrico anual e da coerência dos eventos de chuva-vazão a fim de que se evitem ou minimizem tendenciosidades na simulação hidrológica. A análise dos dados observados deve levar em conta os valores anuais de precipitação, evaporação e vazão a fim de se verificarem erros tendenciosos e grosseiros. A análise dos eventos de cheias e da transformação de chuva em vazão é feita para verificar a coerência dos valores simulados e sua ocorrência temporal.

1.4.3.2 Parâmetros físicos

Os parâmetros físicos da bacia hidrográfica são muito importantes na modelagem hidrológica e podem ser obtidos pela via direta em que as características físicas específicas, como área de drenagem, comprimento e seções, são medidas diretamente no campo. Os parâmetros também podem ser obtidos por amostragem e as condições locais serem extrapoladas espacialmente, como rugosidade do rio, capacidade de infiltração do solo, condutividade hidráulica, entre outros. Se as funcionalidades SIG estão associadas com os modelos hidrológicos certas características da bacia são calculadas automaticamente por meio do processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE). Da mesma maneira, outros parâmetros relacionados com o meio físico (ex.: solos) são obtidos em trabalhos de campo, ensaios de laboratório ou extrapolados para a área de estudo. Os dados de cobertura, uso do solo e práticas agrícolas também são essenciais.

1.4.3.3 Ajustes dos parâmetros

O modelo resultante da simulação deve-se à modelagem hidrológica prévia da bacia hidrográfica, baseado em simplificações e no conhecimento que se tem sobre os dados climatológicos, séries de precipitação e parâmetros conhecidos e/ou calculados. No entanto, em razão das condições iniciais da bacia (ex.: umidade inicial e aquíferos) não serem bem conhecidas, além da quantidade e complexidade de parametrização envolvida, os resultados são gerados com discrepâncias relacionadas com os parâmetros mal estimados que influenciam o comportamento hidrológico sem a correspondência precisa com a representação do fenômeno.

Por causa da complexidade da realidade existe a necessidade de que um conjunto de parâmetros sensíveis seja definido para a tarefa de ajuste (calibração) a fim de que o hidrograma simulado aproxime-se o máximo possível do observado, de maneira que os desvios possam ser minimizados, reduzindo-se as incertezas dos resultados. A abordagem nada mais é do que a verificação e avaliação de como um componente do modelo (vazão ou cargas) responde quantitativa e qualitativamente às diferentes variações sobre os parâmetros. O estudo pode ser feito de modo manual ou com ferramenta automática, considerando os parâmetros individualmente ou um conjunto deles. A análise permite ordenar a influência de cada parâmetro na modelagem.

No entanto, determinar a magnitude dos ajustes dos parâmetros depende do objetivo que se pretende analisar em relação às séries temporais da bacia hidrográfica, como retratar períodos específicos de estiagem ou enchente ou séries contínuas com grande variabilidade de escoamento em que se deseja conhecer a série de vários anos de um determinado local. No primeiro caso, a prática tem sido considerar o conjunto de parâmetros mais sensíveis de alguns eventos para o ajuste e verificar com outros a validade do modelo. No segundo caso, as séries temporais estacionárias devem ser divididas, sendo uma parte para calibração e outra para validação, que em última análise confirma a qualidade e eficiência dos ajustes feitos nos parâmetros para a série calibrada, a fim de que sua aplicação seja generalizada e usada em outros períodos ou em cenários diferentes daqueles então monitorados. Outras situações exigem técnicas mais específicas existentes na literatura, como no caso de bacias sem dados históricos de interesse ou naquelas em que existem dados, mas ocorrem alterações físicas, caracterizando as séries como não estacionárias.

A determinação dos parâmetros que melhor representem o comportamento físico da bacia hidrográfica baseia-se na calibração da série simulada de vazões comparativamente a série observada. O ajuste manual por tentativa e erro é mais demorado, uma vez que pode ser necessário alterar várias vezes cada parâmetro, enquanto são mantidos constantes os demais. Terminada a simulação para o parâmetro ajustado são feitas as verificações dos hidrogramas simulado e observado e avaliados os indicadores estatísticos até que se tenha um resultado aceitável. Em seguida, um novo parâmetro passa a ser abordado. E assim por diante até atingir o melhor desempenho.

A técnica por otimização considera uma função objetivo para obter a melhor solução de ajuste dos parâmetros fixados como influentes na resposta hidrológica da bacia hidrográfica. A função corresponde à equação matemática dos desvios entre os dados simulados e observados, associada a uma ou mais variáveis independentes e às variáveis que são mantidas constantes. A escolha depende do que se pretende evidenciar dos hidrogramas. O problema refere-se a minimizar ou maximizar a função, isto é, calcular os valores para as variáveis que definem a hipótese de mínima ou máxima, sendo mais frequente a minimização. Dependendo do caso as variáveis independentes podem ter restrições ou não, isto é, faixas de valores que delimitam a região contínua da função.

No entanto, a solução matemática pode convergir para valores não inteiramente representativos da realidade física. Os métodos não garantem necessariamente o mínimo global da função objetivo, pois não conseguem resolver satisfatoriamente o problema com vários mínimos locais. Daí que as técnicas e métodos de calibração não substituem a falta de informações das características mais relevantes da bacia hidrográfica, uma vez que podem ser insuficientes nas condições iniciais de simulação, como no caso dos dados a respeito das características dos aquíferos e séries temporais, e de aspectos do clima e variabilidade dos parâmetros dos solos. Além disso, medições imprecisas, interpolações de amostras, erros posicionais e generalização cartográfica costumam aumentar a fonte de incertezas. Outra questão refere-se à capacidade do modelo representar por meio dos seus componentes os processos físicos da bacia. As considerações sobre as incertezas devem ser esclarecidas durante a análise dos resultados das simulações.

1.4.4 Avaliação do desempenho

A maneira mais comum para avaliar o desempenho de um modelo hidrológico para representar a hidrologia observada de uma bacia hidrográfica na etapa de calibração ou validação faz-se por meio de inspeção visual do hietograma e dos hidrogramas simulado e observado e, se necessário, das curvas de permanência, que reproduzem a frequência das vazões, e cuja similaridade indica simulação adequada. No caso dos hidrogramas convém observar a escala de representação gráfica a fim de que a análise seja coerente com o que se pretende explicar. Nesta abordagem podem ser formuladas avaliações subjetivas que estão geralmente relacionadas ao comportamento dinâmico e aleatório dos processos hidrológicos. No entanto, na avaliação do modelo em termos de eficiência recomenda-se que a estimativa seja feita por meio de indicadores estatísticos (MORIASI et al., 2007).

Os indicadores estatísticos determinam a acurácia do modelo hidrológico pela comparação entre os dados simulados e observados. As estimativas traduzem matematicamente os aspectos específicos sobre a capacidade que o modelo tem de reproduzir o comportamento histórico e futuro da bacia hidrográfica. Além da qualidade das séries temporais alguns aspectos influenciam favoravelmente a obtenção de indicadores confiáveis, como bacias com boa densidade de monitoramento, chuva sazonal, declividades relativamente altas, existência de poucos reservatórios, sem planície de inundação e alto coeficiente de escoamento (KRAUSE et al., 2005; LEGATES et al., 1999; MORIASI et al., 2007).

Existem vários indicadores estatísticos na literatura para avaliação do desempenho dos modelos hidrológicos. No entanto, alguns são pouco testados ou usados em aplicações (KRAUSE et al. 2005). Entre os principais coeficientes destacam-se aqueles sugeridos por Moriasi et al. (2007) para o modelo SWAT. São eles: (i) Nash-Sutcliffe (NSE), (ii) tendência percentual bias (PBIAS), e (iii) equação da razão RMSE (RSR). O coeficiente de determinação (R^2) também é muito usado para verificar a correlação entre os dados. Na Tabela 1 estão descritos os principais coeficientes estatísticos de avaliação e as expressões que os definem.

Tabela 1 – Indicadores usados na avaliação de simulações hidrológicas (continua)

Indicador	Descrição*
Nash-Sutcliffe (NSE)	Medida que compara o desempenho em termos da variância das vazões simuladas em relação às observadas, normalizando-as pela variância das vazões médias observadas. Graficamente representa o ajustamento (aderência) das vazões calculadas em relação às observadas. A amplitude de variação está no intervalo $(-\infty, 1]$. A maior desvantagem do coeficiente deve-se às diferenças entre as vazões simuladas e observadas, que são calculadas como valores quadrados. Como resultado, os erros são superestimados nas vazões maiores da série temporal do que nas vazões mínimas. A expressão de cálculo do indicador é dada por: $NSE = 1 - \frac{\sum (obs - sim)^2}{\sum (obs - média\ obs)^2}$
Determinação (R^2)	Medida de correlação linear entre as vazões simuladas e observadas cuja amplitude de variação está no intervalo $[0,1]$, indicando em porcentagem o quanto o modelo estimado consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor de R^2 melhor o ajuste entre os hidrogramas. A inclinação da reta mostra a relação entre os valores simulados e observados. A interceptação da reta no eixo-y indica a presença de um deslocamento (atraso ou adiantamento) entre os valores simulados e observados, ou que os dados não estão perfeitamente alinhados. Se a inclinação corresponder a “1” e a reta interceptar o eixo-y na origem o modelo reproduz fielmente as magnitudes dos dados medidos. Naturalmente, a análise pura deste indicador desconsidera a existência de erros relativos aos dados observados, o que raramente acontece na prática. Assim como o NSE o coeficiente de determinação é mais sensível às diferenças maiores entre valores simulados e observados. O cuidado que se deve ter quando se usa o indicador isoladamente é que ele apenas correlaciona a dispersão entre os valores das variáveis simuladas e observadas. Um modelo que sistematicamente subestima ou superestima as previsões na simulação pode resultar em valores próximos de “1”, mesmo que todas as previsões estejam erradas. Em termos gráficos se a inclinação da reta for diferente de “1” é porque existem diferenças de magnitude entre as vazões. A expressão de cálculo do indicador é dada por: $R^2 = \frac{\sum (obs - média\ obs) * (sim - média\ sim)}{[\sum (obs - média\ obs)^2 * \sum (sim - média\ sim)^2]^{0.5}}$

Tabela 1 – Indicadores usados na avaliação de simulações hidrológicas (conclusão)

Indicador	Descrição*
Tendência percentual bias (PBIAS)	Medida percentual da tendência das vazões simuladas serem maiores ou menores que as respectivas vazões observadas. Valores próximos de zero ou com baixa magnitude indicam boa simulação sem tendência nas estimativas. Se a fórmula de cálculo considera valores simulados menos valores observados o resultado positivo indica que a vazão simulada está superestimada, e subestimada, se o resultado é negativo. A expressão de cálculo do indicador é dada por: $PBIAS = \frac{\sum(sim - obs) * 100}{\sum(obs)}$
Equação da Razão RMSE (RSR)	Medida sugerida por Moriasi et al. (2007) ainda pouco usada nas avaliações. A normalização da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) por meio da divisão pelo desvio padrão das vazões observadas torna o coeficiente adimensional, permitindo que seja usado mais facilmente para comparar os resultados das simulações. Quanto menor o valor de RSR melhor a simulação. Valor zero indica simulação perfeita. A expressão de cálculo do indicador é dada por: $RSR = \frac{[(\sum(obs - sim)^2)]^{0.5}}{[(\sum(obs - média sim)^2)]^{0.5}}$
* Termos usados nas expressões: obs = vazão observada, média obs = média das vazões observadas sim = vazão simulada, média sim = média das vazões simuladas	

Fonte: KRAUSE et al., 2005 e MORIASI et al., 2007.

A Tabela 2 reúne os indicadores estatísticos (NSE, PBIAS, RSR) sugeridos por Moriasi et al. (2007) para avaliarem em conjunto o desempenho da modelagem hidrológica em termos do componente vazão do SWAT. As classificações (escores) indicam a qualidade da simulação das vazões médias anuais e mensais, podendo ser estendidas para vazões médias diárias. O coeficiente de determinação (R^2) também deve ser considerado nas avaliações.

Tabela 2 – Classificação das simulações hidrológicas

Classificação	RSR	NSE	PBIAS
Muito bom	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 \leq NSE \leq 1,00$	$PBIAS \leq \pm 10$
Bom	$0,50 \leq RSR \leq 0,60$	$0,65 \leq NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$
Satisfatório	$0,60 \leq RSR \leq 0,70$	$0,50 \leq NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$
Não satisfatório	$RSR \geq 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$
R^2	Santhi et al. (2001) consideram que valores maiores do que 0,60 são aceitáveis para simulação.		
NSE	Santhi et al. (2001) consideram as seguintes faixas: • $NSE \geq 0,65$ – Muito bom • $0,54 \leq NSE \leq 0,65$ – Bom • $0,50 \leq NSE \leq 0,54$ – Satisfatório		

Fonte: MORIASI et al., 2007.

Krause et al. (2005) comparou nove diferentes critérios de eficiência de avaliação para os modelos hidrológicos e concluiu que cada um deles tem prós e contras, devendo ser levado em conta suas características a fim de que os resultados sejam interpretados convenientemente. Os coeficientes mais usados R^2 e NSE são muito sensíveis às vazões de pico do hidrograma, à custa de um melhor desempenho durante condições de vazões baixas. Logo, se o objetivo do ajuste visa à previsão de cheias, os picos de vazão são importantes e deve-se melhorar o coeficiente NSE, minimizando os erros dos picos. No caso em que se deseja verificar o aproveitamento da água nas estiagens, calcular as afluências a um reservatório ou estimar a disponibilidade hídrica o coeficiente NSE tem menos importância, sendo mais útil analisar a curva de permanência, que mostra a distribuição de frequência das vazões. Os erros nas vazões mínimas não afetam muito os coeficientes R^2 e NSE. Ambos os indicadores ao considerarem o termo quadrático em suas expressões contribuem para uma elevada ponderação dos valores extremos.

Na análise do desempenho das vazões simuladas deve-se integrar o conhecimento dos indicadores estatísticos com a inspeção dos diagramas de dispersão e hidrogramas a fim de que seja possível a avaliação da qualidade dos ajustes e eficiência dos modelos. Além disso, deve-se verificar o balanço hídrico dos componentes do ciclo hidrológico, que nem sempre são bem conhecidos na bacia hidrográfica, em razão da não existência de monitoramentos complementares. De qualquer maneira, há sempre a possibilidade por meios indiretos de ter uma indicação da ordem de grandeza dos volumes a fim de melhorar a capacidade de análise das simulações. Até mesmo o conhecimento do comportamento de bacias com características físicas, de ocupação e uso do solo e climas semelhantes servem para orientar as análises (KRAUSE, 2005; TUCCI, 1998).

1.4.5 Análise de incertezas

Apesar da presente dissertação não estar relacionada com o estudo da incerteza, esta questão é importante na avaliação dos modelos em geral e dos modelos hidrológicos em especial. Em um modelo a incerteza está associada ao grau de desconhecimento que se tem dos resultados obtidos na simulação e os dados observados, traduzido por um grau percentual de confiança. No caso dos valores simulados pode-se estabelecer qual a confiança desejada (90%, 95% e 97,5%) em relação à média observada. Portanto, não se trata de avaliar o ajuste das curvas simulada e observada, mas de quantificar a confiabilidade da estimativa em termos do intervalo de confiança, expresso pela média observada da amostra mais ou menos a

margem de erro calculada com base no desvio padrão e número de elementos da amostra (van GRIENSVEN, 2006).

Refsgaard et al. (2007) classificam a natureza da incerteza, em: (i) epistêmica, devido ao conhecimento incompleto e (ii) estocástica, devido à própria natureza do fenômeno. A primeira pode ser reduzida melhorando a análise dos dados, adicionando pontos de monitoramento, aumentando a dimensão das séries temporais de informação ou aprofundando o conhecimento de como o sistema modelado funciona. A segunda, inerente à natureza caótica dos fenômenos naturais, não pode ser eliminada, independentemente do nível de conhecimento do modelo ou a dimensão das séries.

As principais incertezas na modelagem hidrológica referem-se: (i) às variações aleatórias e erros de aquisição das variáveis de entrada e saída, (ii) às limitações da estrutura dos modelos para representar os processos físicos, e (iii) às dúvidas quanto à estimativa dos parâmetros. No primeiro caso as incertezas envolvem a variabilidade natural, erros de medição das mesmas e insuficiência de dados. Se comparados precipitação e evaporação as variações são mais significativas para a precipitação. O adensamento dos postos de observação e registros tomados em intervalos de tempo subdiários podem minimizar as incertezas. As incertezas por causa da evapotranspiração devem-se às equações escolhidas e aos dados. No segundo caso as incertezas devem-se à capacidade do modelo em representar os processos envolvidos. A escolha do modelo e a disponibilidade de dados podem influenciar os resultados. Nem sempre é possível ou trivial desenvolver equações dentro do conceito estatístico das variáveis e parâmetros das equações diferenciais. No terceiro caso é necessário conhecer a influência de cada parâmetro na variação da resposta de simulação (TUCCI, 1998).

O que se pretende com a investigação da incerteza em um modelo hidrológico é caracterizar com a máxima exatidão a variabilidade natural do sistema e não uma previsão determinística. Nas várias etapas da modelagem e simulação a incerteza deve ser avaliada a fim de que possa ser conhecida e, se possível, mitigada. Com relação ao tipo de incerteza (estatística, cenário, qualitativa e falta de conhecimento) e a fase da modelagem existem ferramentas e metodologias para estimativa em que são abordadas as fontes de incerteza em relação aos dados e ao modelo. De maneira geral, o estudo de incertezas na aplicação de um modelo apenas inclui as características da informação, parâmetros e modelo. Tradicionalmente, a avaliação de incertezas é realizada apenas no final da modelagem depois das etapas de calibração e validação (REFSGAARD et al., 2007).

1.5 Sistemas de Informações Geográficas

Os SIG são cada vez mais usados nos estudos dos sistemas ambientais, entre os quais as bacias hidrográficas, por sua capacidade de integrar os aspectos territoriais e temporais por meio de uma base de dados referenciada espacialmente. Os SIG permitem representar o espaço geográfico e seus objetos de maneira eficiente com as técnicas da cartografia e computacionais. Os SIG são ferramentas computacionais criadas para armazenar, gerenciar e manipular dados geográficos que descrevem objetos do mundo real em termos da sua posição em relação a um sistema de referência espacial, geometria, topologia e atributos.

Os SIG podem ser usados como ferramentas para produção de mapas, banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial, e suporte para análise espacial dos fenômenos (hidrologia, geologia, agricultura, etc.). Cada pacote computacional, em função dos seus objetivos e necessidades, emprega os componentes de modo distinto. Em um nível mais próximo do usuário está a interface que define como o sistema é controlado e operado. O nível intermediário corresponde ao processamento de dados (entrada, edição, análise, visualização e saída). Internamente, o banco de dados geográfico oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Nos SIG os objetos existentes na bacia hidrográfica podem ser representados por estruturas do tipo vetorial e matricial (*"raster"*). No formato vetorial os objetos, com ou sem relações topológicas de conectividade e contiguidade, são representados por pontos, linhas e polígonos associados a sua localização geográfica e dados tabulares sobre suas características. No formato *raster* os objetos são representados por uma grade ou matriz de células (pixels) em que cada célula está referenciada geograficamente e contém um valor numérico, associado ao fenômeno, que pode representar uma característica, um atributo qualitativo ou quantitativo, sendo a resolução espacial dada pelo tamanho da célula.

No caso da bacia hidrográfica, importante dado SIG é o MDE, que representa a distribuição contínua das altitudes deste espaço. Com este plano de informação pode ser gerada a drenagem e discretização da bacia, bem como extraídos diversos parâmetros geomórficos, como perímetro, área, declividades e características dos canais, que servem de entradas aos modelos hidrológicos de base física, assim como a criação de perfis/seções, cálculo de volumes, visões sombreadas do relevo etc. A qualidade dos produtos obtidos está relacionada com a resolução espacial do MDE.

Os SIG possibilitam a integração dos planos de informação temáticos, sobre solo, geologia, vegetação, localização de redes de monitoramentos etc., que complementam o entendimento do espaço geográfico da bacia hidrográfica. Dessa maneira, ao integrar o conhecimento da bacia tornam a aplicação compreensiva e por meio de suas funcionalidades permite a manipulação e análise dos dados para geração de novos produtos (mapas, gráficos e tabelas), e modelagem das informações espacialmente distribuídas (TUCCI, 1998).

No caso dos estudos hidrológicos os SIG podem ser usados isoladamente para manipulação e análise dos dados geográficos da bacia hidrográfica ou integrados/acoplados com modelos hidrológicos, aproveitando seu maior potencial no estudo dos fenômenos e processos hidrológicos e suas interações no âmbito da bacia, bem como dos efeitos que as alterações do clima e antrópicas podem causar na produção de água, sedimentos e contaminantes, como meio de aplicar o conhecimento adquirido à gestão, planejamento e tomada de decisão na área dos recursos hídricos.

A integração entre modelo hidrológico e SIG tem sido importante em diversas aplicações. De um lado, os modelos são capazes de representar o comportamento dos fenômenos hidrológicos de caráter espaço-temporal por meio de equações matemáticas. De outro, o ambiente SIG empresta suas funcionalidades, como banco de dados, processamento de MDE, armazenamento e operações sobre informações espaciais e não espaciais para simular os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Os esforços no sentido dessa integração começaram no final da década de 1980, em razão da diminuição do custo da tecnologia computacional e aumento da velocidade dos processadores, assim como das demandas para melhorar a capacidade analítica para que fossem obtidas representações mais acuradas do ambiente. Os avanços foram dirigidos para modelagem e simulação dos fenômenos hidrológicos, processamento de modelos numéricos para representação topográfica da bacia e espacialização dos dados climáticos.

A conexão entre modelo hidrológico e SIG pode variar. No *acoplamento fraco* os dados gerados no ambiente SIG são usados como entradas para o modelo e as saídas são transferidas ao SIG para exibição. A troca dos dados faz-se com arquivos no formato ASCII ou binários. Esta é uma limitação para os modelos que usam formatos fixos para organizar os dados de entrada. Outra desvantagem é não aproveitar toda a funcionalidade de análise espacial do SIG. Na *ligação forte* os dados são trocados automaticamente e a exibição dos resultados deve ser configurada com as funcionalidades do SIG, que é usado como interface para exibição e interpretação. A vantagem está no desempenho computacional e na interatividade entre os dois softwares. As técnicas de *overlay*, *buffer* e de localização estão

disponíveis, aumentando a capacidade de interpretação dos SIG. O *acoplamento integrado* se dá por meio da incorporação dos componentes funcionais de um sistema dentro do outro, eliminando a necessidade de software intermediário para transferência dos dados. O SIG e o modelo não são mantidos como unidades independentes. Os dados e processos são compartilhados pelos sistemas. A grande vantagem deve-se ao melhor desempenho e flexibilidade da análise espacial, em razão das funções SIG estarem disponíveis para o usuário. A análise de cenários, outra vantagem, tem sido pouco explorada em tais sistemas devido à complexidade do seu desenvolvimento, especialmente em modelos de qualidade da água (MARTIN et al., 2005; SUI; MAGGIO, 1999).

Martin et al. (2005) destacaram algumas questões que devem ser aperfeiçoadas nos SIG para que sejam superadas as limitações em relação aos modelos hidrológicos de base física:

- a) A representação rígida dos dados nos SIG por meio de vetores ou matriz de células não atende aos modelos estocásticos. Em tais modelos o espaço e o tempo são conceitualizados de maneiras diferentes, uma vez que as variáveis são representadas como um campo aleatório, uma região do espaço e do tempo em que o valor das variáveis em cada ponto é definido pela distribuição de probabilidade. Uma nova estrutura precisa ser desenvolvida que considere espaço, tempo e aleatoriedade.
- b) A fraca capacidade dos SIG lidarem com dados que representam fluxos. Nos SIG a representação dos fluxos é baseada em algoritmo que implementa o objeto em movimento, enquanto nos modelos hidrológicos considera-se a visão de um quadro fixo no espaço através do qual o movimento ocorre.
- c) No caso da variável tempo existem várias estruturas para sua representação, como discretas ou contínuas, lineares, cíclicas e associadas a intervalos de duração. Apesar disso, não fazem parte da maioria dos modelos de dados nos SIG. A atual geração SIG somente captura a variação temporal no espaço de maneira estática, não sendo compatível com a representação dinâmica ou temporal dos fenômenos.

- d) No caso da discretização do espaço e da resolução espacial o conhecimento dos impactos nos resultados da modelagem hidrológica tem sido bem discutido. No entanto, há necessidade de pesquisa sobre as interações do clima, águas superficiais e subterrâneas que estão relacionadas com os processos nos âmbitos regional e local.
- e) Ao contrário do que acontece nos modelos em que prevalece o rigor matemático nos SIG os relacionamentos espaciais não conseguem capturar eficientemente os algoritmos hidrológicos, uma vez que a associação entre os dados é feita de maneira clássica em que dois conjuntos de dados usam uma chave comum. Dessa maneira, o uso de algoritmos avançados ou estruturas matemáticas complexas encontram dificuldades de serem integrados inteiramente na base de dados relacional SIG.

1.6 Modelos hidrológicos de base física

Restrepo e Schaake (2009) destacaram a necessidade de que novas pesquisas na área dos modelos hidrológicos de base física incluam aspectos que melhorem seu desempenho nas aplicações, entre eles: (i) inclusão de diferentes fontes de incerteza, (ii) diminuição do esforço requerido na calibração dos parâmetros, (iii) melhorias na previsão e tempo de processamento, (iv) capacidade para realização de ajustes, (v) inclusão de meios para previsão de temperatura, umidade do solo e qualidade da água, (vi) melhoria das técnicas para estimar precipitações por meio da combinação das observações com sensores remotos e previsões obtidas com modelos numéricos de alta resolução, e (vii) inclusão de técnicas estatísticas para adequar a escala global dos eventos climáticos aos processos modelados.

Daniel et al. (2011) destacaram algumas questões importantes relacionadas com os modelos hidrológicos de base física:

- a) Atualmente, os avanços realizados na área das geotecnologias auxiliam a geração, preparação e gerenciamento dos dados necessários à modelagem. Em muitas aplicações pouco ou nenhum dado está disponível para o estudo de bacias. Nestes casos as funcionalidades SIG baseadas em técnicas de interpolação geoestatística oferecem opções para geração de dados.

- b) No campo da estimativa e calibração de parâmetros, assim como na análise de incertezas, alguns desafios estão sendo considerados pelos pesquisadores para o aperfeiçoamento dos modelos. Entre eles, a não linearidade de certos processos, os erros relacionados com os dados, a insuficiência de dados, a correlação entre parâmetros, a resposta irregular de processos para certos conjuntos de parâmetros, a natureza dos objetivos dos modelos, e a melhoria de previsão para bacias não monitoradas, onde os dados são esparsos e de baixa qualidade.
- c) Outras questões devem incluir a modelagem do transporte de contaminantes através dos volumes existentes na bacia e técnicas para avaliar a qualidade da água nos rios, tendo em vista as interações químicas e biológicas no ambiente, assim como a integração dos modelos com sistemas de apoio à decisão.

Na Tabela 3 estão indicados alguns pacotes de domínio público de modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água para aplicações em bacias agrícolas. O AnnAGNPS e o SWAT têm os principais componentes: hidrologia, sedimentos e químicos. O PRMS é baseado na equação do escoamento. O HSPF é preferido para áreas mistas (urbanas e rurais). O WEPP é voltado para avaliação dos processos erosivos do solo.

Tabela 3 – Modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água (continua)

Modelos	Componentes	Fluxo superficial	Fluxo subsuperficial	Qualidade	Escala espacial	Escala temporal	Representação da bacia
AnnAGNPS <i>Annualized Agricultural Non-point Source</i>	Sedimento, nutriente e pesticida	CN, TR-55 para fluxo de pico de vazão	Equação de Darcy	N, P, pesticidas, carbono orgânico, nutrientes	Distribuído	Passo diário, subdiário	Superfície, canais, corpos hídricos
ANSEWRS 2000 <i>Area Non-point Source Watershed Environment Response Simulation</i>	Escoamento superficial, infiltração, drenagem subsuperficial, solo, sedimento	Equação de Manning, equação de continuidade	Não existe componente	Não existe componente	Distribuído	Evento	Grade regular
HSPF <i>Hydrological Simulation Program – FORTRAN</i>	Escoamento superficial, áreas permeáveis/impermeáveis, canais, corpos hídricos	Base empírica	Percolação, escoamento de base	Temp. da água/solo, CO ₂ , N, NH ₄ , N/P orgânico, pesticidas	Semi-distribuído	Contínuo	Superfície, canais, corpos hídricos

Tabela 3 – Modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água (conclusão)

Modelos	Componentes	Fluxo superficial	Fluxo subsuperficial	Qualidade	Escala espacial	Escala temporal	Representação da bacia
PRMS <i>Precipitation-Runoff Modeling System</i>	Hidrologia, escoamento superficial, canais, corpos hídricos, solo, sedimento	Equações de onda cinemática	Não existe componente	Não existe componente	Distribuído	Evento	Superfície, canais, corpos hídricos
WEPP <i>Water Erosion Prediction Project</i>	Geração clima, irrigação, infiltração, fluxo superf., crescimento de vegetação, solo	Equações de onda cinemática	Equação de Green & Ampt	Não existe componente	Distribuído	Contínuo	Canais, corpos hídricos
SWAT <i>Soil and Water Assessment Tool</i>	Clima, sedimento, solo, crescimento de vegetação, nutrientes, pesticidas, manejo, canais, <i>reservoirs</i>	CN para escoamento superficial, TR-55 para fluxo de pico de vazão	Fluxo lateral, escoamento de base	N, P, pesticidas, C	Semi-distribuído	Contínuo, passo diário	Sub-bacias, URH, aquíferos, canal principal, <i>reservoirs</i>

Fonte: DANIEL et al., 2011.

1.7 Sistema hidrológico SWAT

O SWAT é um modelo de base física semidistribuído que opera de maneira contínua para simular o ciclo hidrológico e estimar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimento e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas. Os processos físicos, associados com o movimento da água e sedimento, crescimento de vegetação, ciclo do nitrogênio, e outros, são modelados por meio de equações matemáticas relativamente simples com base nas informações sobre o clima, propriedades do solo, topografia e operações agrícolas (NEITSCH et al., 2005).

A origem do SWAT pode ser atribuída às ações que remontam à década de 1930, quando as primeiras iniciativas do Serviço de Conservação de Solos dos EUA (*Soil Conservation Service - SCS*) tinham como preocupação entender e analisar os processos hidrológicos nas bacias agrícolas, por causa dos impactos do manejo do solo sobre a erosão dos solos, inundações, recursos hídricos e economia. Daí em diante as equipes que passaram pelo Departamento de Agricultura realizaram monitoramentos contínuos, coletas e pesquisas que culminaram nos dias atuais com o desenvolvimento de vários modelos hidrológicos de simulação (GASSMAN et al., 2007).

A partir da década de 1980 os seguintes modelos contribuíram para consolidação do SWAT:

- a) CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management*) – desenvolvido (Knisel, 1980) para modelar o impacto da gestão do uso do solo na água, sedimentos, nutrientes e pesticidas. A precipitação diária foi introduzida como componente hidrológico.
- b) GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*) – desenvolvido (Leonard et al., 1987) para simular a contaminação de aquíferos por pesticidas.
- c) EPIC (*Environmental Impact Policy Climate*) – desenvolvido (Williams et al., 1984) para simular os processos de erosão do solo, em particular o impacto da erosão causada pela atividade agrícola.
- d) SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) – incorporou (Arnold & Williams, 1987) os componentes dos três modelos CREAMS, GLEAMS e EPIC, e outros novos para simular os impactos do manejo do solo sobre a água e transporte de sedimentos em bacias não instrumentadas.
- e) ROTO (*Routing Outputs to Outlet*) – desenvolvido (Arnold et al., 1990) para ampliar a capacidade do SWRRB em simular áreas maiores.
- f) GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) – primeira interface SIG (Srinivasan & Arnold, 1994).

O SWRRB é o núcleo do SWAT com seus vários componentes. Com a inclusão do ROTO o modelo ampliou sua eficiência computacional para simular mais de 10 sub-bacias, permitindo a estimativa dos impactos no uso do solo das sub-bacias nas áreas a jusante. Entre as principais mudanças incluídas no SWRRB estão: (i) simulação simultânea da vazão em diversas sub-bacias, (ii) adição do fluxo subterrâneo e do fluxo de retorno, (iii) incorporação do armazenamento em lagos e reservatórios, (iv) incorporação de dados de chuva, radiação solar e temperatura para simulações de longos períodos e sua representação espacial, (v) aperfeiçoamento do método que prevê a taxa de pico de escoamento no canal, (vi) adição do modelo de crescimento de vegetação do EPIC, (vii) adição da rotina para estimar inundação, (viii) adição dos componentes de transporte de sedimentos para simular o movimento em lagos, reservatórios, canais e vales, e (ix) incorporação do cálculo da perda por transmissividade.

Além de servir de base para o desenvolvimento de outros modelos a fim de atender aplicações específicas o SWAT tem sido aprimorado continuamente desde sua criação com a expansão dos recursos de modelagem hidrológica e criação de interfaces SIG para suportar as entradas de topografia, uso do solo, tipo do solo e outras informações espaciais. O SWAT2000 adotou a linguagem de programação Fortran90, disponibilizou no seu *website* os manuais de documentação teórica, das entrada/saída e tutorial. A versão 2005, entre outros recursos, incluiu as ferramentas automáticas de análise de sensibilidade e calibração a fim de aumentar a eficiência analítica dos resultados das simulações (NEITSCH et al., 2005).

Desde 2001 várias conferências internacionais foram promovidas pela equipe do SWAT. A primeira foi na Alemanha e a próxima será realizada em julho de 2014 na cidade do Recife, confirmando a importância que o modelo passou a ter no Brasil. Com relação aos artigos científicos publicados em todo o mundo o SWAT mantém uma lista completa e atualizada no *SWAT Literature Database*.

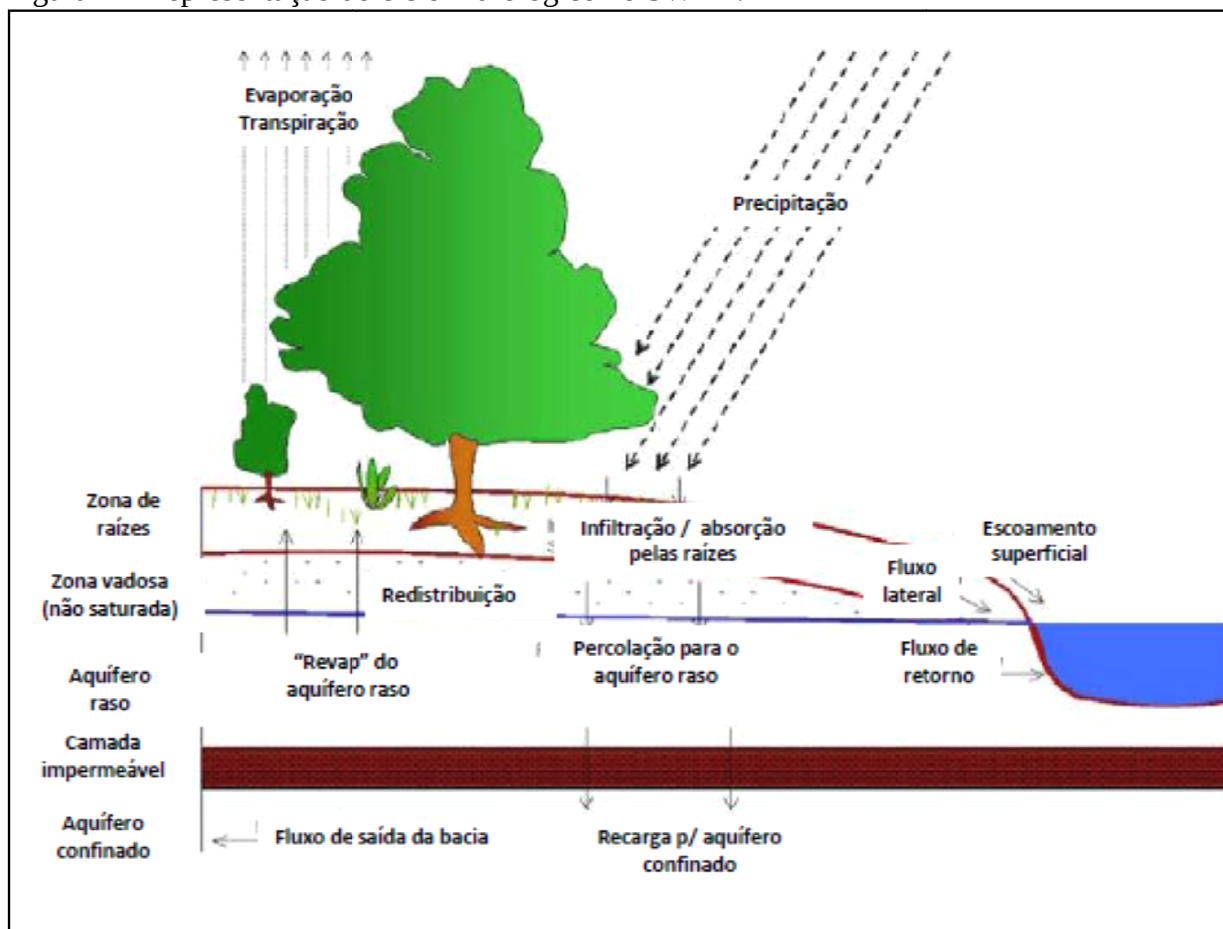
1.7.1 Descrição do SWAT2005

As informações a seguir sobre o SWAT2005 descrevem a maneira como os componentes do ciclo hidrológico são considerados pelo modelo na simulação do processo chuva-vazão, bem como os aspectos de sua implementação pela interface SIG. Todos os conceitos estão disponíveis em Neitsch et al. (2005), no *SWAT Theoretical Documentation – Version 2005* e Winchell et al. (2007), no *ArcSWAT Interface for SWAT 2005 – User’s Guide*.

1.7.1.1 Aspectos conceituais

O SWAT realiza a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica com base na fase terrestre (“*land phase*”) e na fase de propagação (“*routing phase*”) do ciclo hidrológico (Figura 1). Os resultados da fase terrestre alimentam o módulo que representa as perdas por amortecimento e propagação das massas de água ao longo da rede de drenagem. O módulo de amortecimento e propagação adota a equação de Manning e gerencia o translado das massas de água, sedimentos e químicos através da rede fluvial e de canais das sub-bacias que compõem a bacia. O modelo permite também a representação de corpos hídricos dentro e fora da rede de drenagem.

Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico no SWAT.



Fonte: NEITSCH et al., 2005.

Os componentes hidrológicos do SWAT estão descritos resumidamente no Apêndice A. Na presente dissertação foram representados e analisados somente os processos que envolvem a produção de água e seu transporte na rede de canais. No entanto, apesar de não ser escopo deste estudo vale destacar que o componente de manejo do solo fornece submodelos que simulam as condições de cultivo, plantio, irrigação, aplicação de fertilizantes e nutrientes, colheita e pastoreio. O modelo também fornece a base de dados que contém as informações para simular a redistribuição de nutrientes e pesticidas que ocorrem em várias operações de preparo do solo para o cultivo com o tipo de equipamento usado e os valores da profundidade e eficiência da mistura desses constituintes. Se entre as operações de manejo houver aplicação de fertilizantes e/ou pesticidas o composto especificado em cada caso correlaciona automaticamente os valores dos parâmetros por meio das respectivas bases de dados.

O SWAT pode ser usado para simular uma única bacia hidrográfica ou um sistema de múltiplas bacias interconectadas. Cada bacia pode ser dividida em uma ou mais sub-bacias e estas discretizadas em uma ou mais combinações homogêneas de cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade, denominada de “unidade de resposta hidrológica” (URHs). A divisão em URHs é particularmente importante em bacias dominadas por usos do solo distintos. Dessa maneira, na fase de simulação a variabilidade espacial dos parâmetros da bacia pode ser capturada no cálculo dos componentes hidrológicos por meio da equação do balanço hídrico.

O cálculo do balanço hídrico baseado no princípio da conservação de massa é realizado separadamente em cada URH. O somatório correspondente à sub-bacia é transferido para a rede de canais que conduzem o volume para o exutório. As URHs na sub-bacia não estão interligadas logicamente. São unidades estanques para a quantificação dos processos. Ao contrário, as sub-bacias são interligadas pelo canal que as atravessa e conduz a água e cargas até o exutório.

O SWAT possui dois métodos para calcular o escoamento superficial. O *método SCS Curva Número* gera o escoamento com base em séries diárias de precipitação, sendo capaz de simular longos períodos para computar os efeitos das alterações provocadas pela ocupação e uso do solo, gerando saídas diária, mensal ou anual dos componentes do ciclo hidrológico. O *método Green & Ampt* simula a infiltração com séries subdiárias de precipitação. Neste caso, a água que não infiltra gera o escoamento superficial.

Na bacia hidrográfica as condições do clima são resultantes da umidade e energia, que dependem das variações de precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. O modelo controla além dos volumes líquidos, a perda de solos por erosão, os vários modos de transformação dos nutrientes com base nos ciclos do nitrogênio e fósforo, o transporte dos pesticidas em solução ou absorvidos nos sedimentos direcionados para os canais ou para as zonas inferiores dos solos até os aquíferos.

O crescimento de vegetação tem como base os conceitos sobre o desenvolvimento fenológico. O crescimento pode ser inibido pelo estresse devido à temperatura, água e nutrientes. O modelo tem informações sobre diversos tipos de coberturas e culturas vegetais e simula o crescimento para calcular a remoção de água e nutrientes através da zona radicular, transpiração e produção de biomassa. O modelo pode diferenciar entre plantas anuais e perenes. Estas mantêm um sistema radicular durante o ano, ficando em dormência no inverno. O ciclo do crescimento é importante nas aplicações que consideram o manejo do solo ou não. Dessa maneira, atende às necessidades das aplicações em que existem coberturas naturais ou culturas não manejadas. A produção de biomassa em condições ideais é calculada diariamente

se a temperatura diária estiver acima da temperatura basal, sendo função da energia interceptada pela planta, que é função da radiação solar e do índice de área foliar, e da eficiência em converter energia em biomassa.

A temperatura média do solo impacta o movimento da água e a taxa de decaimento de resíduo no solo. É calculada com base na temperatura da superfície do solo, que é função da cobertura vegetal, cobertura residual de colheitas, temperatura do solo nu e temperatura anterior da superfície do solo, e com base na temperatura no centro da camada do solo, que é função da temperatura da superfície e profundidade do solo. A profundidade é dependente da densidade volumétrica do solo e do seu conteúdo de umidade. Se a temperatura do solo for menor ou igual a 0°C não há movimento de água.

1.7.1.2 Planos de informação

Os dados espaciais são fundamentais para introduzir a bacia hidrográfica no SWAT e requer a entrada dos planos de informação MDE, hidrografia, cobertura/uso do solo e tipo do solo. A topografia da bacia é usada para determinação das direções dos fluxos, localização dos canais e energia potencial para o transporte de água, sedimentos e nutrientes durante a simulação. Quanto maior a resolução do MDE maior a acurácia em relação à representação altimétrica e das direções dos escoamentos na bacia.

Inicialmente, o MDE é processado para gerar a superfície de direção de fluxo acumulado. Em seguida, a rede de canais é definida com a especificação de um valor limite de área para formação dos canais. Quanto menor esta área maior o detalhamento da drenagem e o número de sub-bacias que podem ser criadas. O modelo fornece uma faixa de valores para a área limite que pode ser testada a fim de que se defina o esquema de representação da hidrografia, compatível com a escala da aplicação. Finalmente, com o processamento da área limite a rede de canais é formada por segmentos e junções (“outlets”). As junções definem os pontos divisórios das sub-bacias.

A interface depois da geração da rede de canais permite qualquer configuração de sub-bacias por meio da eliminação ou inclusão de junções. Esta característica flexibiliza os estudos hidrológicos, porque podem ser definidos pontos de interesse específicos na drenagem, onde exista, por exemplo, estação de monitoramento em seção do canal mesmo que não corresponda a uma confluência de canais. Neste caso, o ponto criado torna-se do ponto de vista da modelagem uma junção que determina a montante a área que se quer estudar (sub-bacia). A adição de junções é recomendada se for necessário: (i) reduzir o tempo de

transporte nos canais a fim de que não supere um dia na sub-bacia, (ii) igualar a área das sub-bacias, e (iii) otimizar a simetria da sub-bacia a fim de que o tempo que a água leva para atravessá-la seja igual em todos os seus pontos.

Estabelecido o esquema de junções deve ser fornecida a localização do exutório. Em seguida, o processamento culmina com a geração de uma ou mais sub-bacias que ficam espacialmente conectadas pelos segmentos dos canais. O modelo considera os canais com o formato trapezoidal para os cálculos de transporte e amortecimento das cargas e perdas associadas. Além do perfil de seção transversal, os canais têm outras características, como comprimento, declividade, largura e profundidade. As sub-bacias ficam definidas por suas localizações, perímetros e áreas. A introdução de corpos hídricos se necessários à modelagem pode ser feita nesta etapa.

Terminado o delineamento da bacia hidrográfica os planos de informação cobertura/uso do solo e tipo do solo devem ser inseridos e reclassificados a fim de que as classes existentes sejam associadas ao esquema de distribuição das sub-bacias que foram geradas e aos seus dados. Nesta etapa as bases *Land cover/Plant growth* e *User soil database* são ligadas modelo. O plano de declividades é gerado a partir do MDE e reclassificado de acordo com o número de classes e respectivos intervalos que devem ser especificados. A divisão em classes de declividades é recomendada para aumentar a distribuição espacial da variação topográfica nas URHs. O limite máximo de cinco classes permitido pelo modelo em geral é suficiente. Uma boa definição de classes pode influenciar o tempo com que o escoamento superficial atinge os canais de drenagem, implicando em menores ou maiores vazões e ocorrência dos picos. Posteriormente à reclassificação deve ser feita a sobreposição (“*overlay*”) dos planos de informação.

O conhecimento da distribuição das áreas temáticas com base no relatório gerado pelo modelo depois da reclassificação/*overlay* é relevante para o procedimento subsequente de geração das URHs, que pode (ou não) considerar a eliminação de classes minoritárias referentes à cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade. A eliminação das classes tem como objetivo reduzir/simplificar o número de combinações elementares. Neitsch et al. (2002) sugerem que o número máximo de URHs não deve ultrapassar 10 por sub-bacia, uma vez que sua quantidade aumenta muito a complexidade para o controle dos parâmetros e processos na etapa de calibração, além de exigir maior esforço computacional. Em certos casos pode ser mais interessante trabalhar com um número maior de sub-bacias.

O modelo admite três opções para geração de URHs no nível da sub-bacia, sendo duas automáticas com base na cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade dominante, e na URH dominante. A terceira opção gera múltiplas URHs. Neste caso podem ser definidos níveis de sensibilidade para eliminação de classes de cobertura/uso do solo, tipo do solo e declividade, considerando aquelas que não tenham influência significativa nos resultados da simulação. A sequência é feita seguindo uma ordem em que pelo menos um dos temas seja considerado. Se todos os temas têm classes para serem eliminadas, em primeiro lugar eliminam-se classes de cobertura/uso do solo em relação à área da sub-bacia. Em segundo lugar, eliminam-se classes de solos em relação à área de cada classe de cobertura/uso do solo remanescente da fase que a precede. Em terceiro lugar, eliminam-se classes de declividades em relação à área de cada classe de solo remanescente da fase que a precede. No caso dos solos é recomendado que classes com área igual ou menor do que 3% em relação à área de cobertura/uso do solo podem ser eliminadas. No entanto, percentuais maiores podem ser considerados com base nas particularidades da área estudada. A mesma lógica vale para classes de cobertura/uso do solo em relação às áreas das sub-bacias.

O papel desempenhado pelas URHs na bacia hidrográfica é muito importante, considerando que a maior parte da parametrização é feita no nível destas unidades homogêneas e muitos processos são simulados com esta abrangência espacial. Não existem interações entre as URHs em uma sub-bacia (fato já mencionado), uma vez que o modelo não implementa esta conectividade. Caso seja importante a interação entre as áreas em termos de fluxos hidrológicos deve-se optar pela discretização mais abrangente em sub-bacias, porque somente neste nível as relações espaciais podem ser especificadas pelo modelo. Como regra geral uma sub-bacia deve ter de 1 a 10 URHs. Se houver necessidade de incorporar maior complexidade à bacia deve ser definido um número maior de sub-bacias.

1.7.1.3 Dados de entrada

O SWAT tem um forte componente físico e requer uma grande quantidade de dados. A seguir são listadas as entradas essenciais do modelo:

- a) Parâmetros físico-hídricos dos perfis dos solos que devem ser inseridos na base *User soils database*.
- b) Parâmetros de cobertura/uso do solo fornecidas na base *Land cover/Plant growth database*.

- c) Séries meteorológicas diárias com dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. As entradas de precipitação devem ser subdiárias para aplicações com o método de infiltração Green & Ampt.
- d) Dados mensais das variáveis meteorológicas que devem ser inseridos na base *User weather stations database* necessários para gerar o clima se não estão disponíveis as séries diárias.
- e) Localização das estações meteorológicas e climática que fazem a ligação com os dados meteorológicos e com a base *User weather stations database*. Um arquivo deve ser criado para cada variável e pode conter uma ou mais estações. O modelo considera com base nos centróides a estação mais próxima da sub-bacia.

No SWAT um aspecto importante sobre os solos refere-se ao parâmetro Curva Número (CN), que é função da permeabilidade, do uso do solo e da condição inicial de umidade do solo, que determina a relação entre a infiltração e o escoamento superficial durante os eventos de precipitação. O parâmetro CN é ajustado em função da retenção de umidade no solo. O valor de CN aproxima-se de 100 à medida que o solo atinge a saturação. No modelo sua estimativa pode ser um fator de incerteza em função da variabilidade espacial dos parâmetros físico-hídricos do solo. A condição de umidade antecedente corresponde ao valor do parâmetro CN2 relativo à situação média de umidade do solo, entre seco (CN1), relativo à umidade do solo no ponto de murcha permanente, e saturado (CN3), relativo à umidade do solo na capacidade de campo. Os valores de CN1 e CN2 são calculados a partir de CN2. O modelo calcula o parâmetro de retenção em função da disponibilidade de água no solo ou em função da evapotranspiração da vegetação.

O SWAT usa a equação de infiltração de Green & Ampt modificada (Mein e Larson, 1973) para calcular o escoamento superficial com dados de precipitação subdiários. Neste caso, são necessários os parâmetros de precipitação, condutividade hidráulica efetiva, potencial matricial da frente de umedecimento, variação do conteúdo de umidade do solo e infiltração acumulada no intervalo de tempo. A condutividade hidráulica efetiva é função da condutividade hidráulica saturada e do parâmetro CN2. Este incorpora na equação de infiltração os impactos no uso do solo no cálculo da condutividade hidráulica efetiva. Se operações de manejo do solo fazem parte da aplicação o valor de CN2 pode ser substituído pelo valor de CNOP relativo ao tipo de operação envolvida.

Se não são fornecidas as variáveis meteorológicas o modelo pode gerar o clima para a bacia hidrográfica por meio do “gerador climático” que usa os dados estatísticos mensais do *User weather stations database*. Esta base é obrigatória e deve ser criada com série histórica de dados, não inferior a cinco anos (preferencialmente 20 anos ou maior), que seja representativa das condições climáticas da área estudada. Vale ressaltar que nem sempre as séries disponíveis são longas ou contêm todas as variáveis desejadas. Se existem tais dificuldades podem ser feitas composições com outras fontes de dados ou mesmo serem obtidos indiretamente, o que é muito comum para velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ponto de orvalho. Mas neste caso a aplicação está sujeita a incertezas maiores nos resultados.

Se não forem fornecidos os dados de evapotranspiração potencial o modelo dispõe de três métodos para calculá-la: (i) Hargreaves, (ii) Penman-Monteith e (iii) Priestley-Taylor. Os métodos variam em função da quantidade das variáveis usadas nas equações. A escolha do método deve levar em conta as características da bacia hidrográfica e a qualidade dos dados usados nas fórmulas matemáticas.

1.7.1.4 Parametrização

Os dados referentes à parametrização advêm do processamento dos planos de informação e dos dados fornecidos ao modelo. Ao terminar a associação dos dados meteorológicos por meio das tabelas de localização das estações é liberado o comando *Write all* para criação dos arquivos parametrizados (“*Inpu files*”) no nível de bacia, sub-bacia ou URH, conforme a abrangência espacial do macroprocesso/componente hidrológico a ser simulado. Nesta etapa ainda não se dispõem de todos os dados necessários à modelagem, como manejo do solo, uso de água, aplicação de fertilizantes e pesticidas, além dos parâmetros relacionados com métodos/algoritmos específicos para execução do modelo. Vale ressaltar que se houver alteração na distribuição das URHs nova associação com os dados de clima e parametrização devem ser realizadas.

1.7.1.5 Edição

Antes que se passe à execução do modelo (simulação) pode existir a necessidade da definição/alteração de alguns parâmetros relativos à aplicação. Nesta etapa são disponibilizadas para edição as bases de dados e arquivos parametrizados (“*databases / Input files*”). Os parâmetros de configuração, execução, métodos e controle também devem ser informados. Os parâmetros necessários que ainda não haviam sido especificados podem ser inseridos, como aqueles relacionados com aquíferos, manejo do solo, química do solo, usos consuntivos, qualidade da água, corpos hídricos e fontes pontuais de poluição. Além disso, certas alterações podem ser necessárias para corrigir dados que foram fornecidos inicialmente, em razão de conhecimentos específicos que se tem sobre a bacia hidrográfica. Finalizadas as modificações a parametrização deve ser atualizada por meio do comando *Rewrite input files*, ficando o modelo pronto para execução.

1.7.1.6 Simulação

Nesta etapa a simulação é realizada considerando um determinado período de tempo, coberto pela existência de dados de precipitação. Em função do intervalo dos registros de precipitação é definido o método para o cálculo do escoamento superficial. As opções de saída para os resultados do balanço hídrico podem ser nos formatos diário, mensal ou anual. O formato horário é admitido somente nos casos em que a série de precipitação usada for subdiária, mas neste caso o modelo fornece somente os dados dos componentes de vazão total e escoamento superficial. As saídas para o conteúdo de umidade do solo também podem ser geradas se houver interesse.

1.7.1.7 Análise de sensibilidade e calibração

A etapa de calibração pode ser árdua, em razão do grande número de parâmetros e processos determinados pelo nível de discretização da bacia hidrográfica. A identificação dos parâmetros mais relevantes e o peso que cada um tem nas respostas hidrológicas tornam a tarefa difícil e demorada. Nestes casos, antes do ajuste pode ser verificada a sensibilidade dos parâmetros. A ferramenta automatizada facilita identificar e classificar com rapidez os parâmetros escolhidos para análise. A análise de sensibilidade pode identificar os parâmetros que melhorem um processo/característica do modelo ou que são afetados pelas características

da bacia hidrográfica. No primeiro caso, a análise é feita apenas com os dados simulados para identificar o impacto de ajustar o valor referente ao conjunto de parâmetros com base em alguma medida de saída, como vazão média, ou um valor mínimo/máximo. No segundo caso, a análise é feita com as vazões observadas para comparar com os dados simulados.

O SWAT2005 executa a análise de sensibilidade sobre um conjunto de parâmetros que estão relacionados com o componente que se pretende ajustar: vazão, sedimento ou qualidade. Em cada simulação o resultado pode ser comparado com a própria saída (vazão média, mínima, máxima) ou com os dados observados. No caso em que os resultados são comparados com os dados observados duas funções objetivo estão disponíveis para encontrar o mínimo que representa a melhor solução: (i) SSQ – Soma dos Quadrados dos Resíduos e (ii) SSQR – Soma dos Quadrados das Diferenças dos Resíduos Ranqueados. Estas funções consideram o somatório dos quadrados das diferenças entre o valor simulado e observado (resíduos). A primeira função é similar ao método do erro médio quadrático e aproxima os pares da série simulada à observada. A segunda função aproxima a distribuição de frequência da série simulada à observada. Na função SSQR ao contrário da função SSQ o tempo de ocorrência de um dado valor da variável não é considerado, uma vez que antes de se aplicar a diferença entre os termos as séries são ordenadas.

No SWAT2005 a análise de sensibilidade é feita pelo método estatístico LH-OAT, que combina os algoritmos LH (*Latin Hypercube*) e OAT (*One-factor-At-a-Time*). O LH realiza amostragens estratificadas sobre o conjunto de parâmetros escolhidos. Cada um dos parâmetros está associado a um valor mínimo e máximo de variação. O LH divide a distribuição do parâmetro em “N” intervalos de valores, todos com a mesma probabilidade de ocorrência “1/N”. O LH requer um número de repetições que deve ser operado sobre o conjunto investigado. Inicialmente, o LH define de maneira aleatória os valores da primeira amostra que contém todos os parâmetros a serem investigados, considerando os intervalos de valores em que foram divididos. Com esta amostra o OAT seleciona um dos parâmetros do conjunto e modifica seu valor com base num percentual de alteração. Em seguida o modelo é executado e gera um resultado. Novamente, um novo parâmetro é selecionado e variado. E assim até que todos os parâmetros tenham sido variados dentro do mesmo ciclo. O processo recomeça com a seleção pelo LH de uma nova amostra. Depois que todas as repetições forem concluídas o processo termina. O efeito final é calculado pela média dos efeitos parciais de cada ciclo para todos os pontos. Este índice permite a análise comparativa e hierarquização (ranqueamento) entre os parâmetros. Uma classificação em diferentes categorias de sensibilidade dos parâmetros foi sugerida por van Griensven (2006) em que a posição “1” é

“muito importante”, as posições de “2” a “6”, “importantes”, e as posições de “7” a “20”, “pouco importantes” (VAN LIEW; VEITH, 2010).

No caso da autocalibração o SWAT2005 usa o método PARASOL (*Parameter Solutions*) para testar o conjunto de parâmetros escolhidos do componente hidrológico a ser simulado (vazão, sedimento ou qualidade) e comparado com a série observada. Inicialmente, uma população de pontos é gerada entre os limites mínimo e máximo de cada parâmetro e separada em complexos que se desenvolvem baseados no processo de reprodução. A otimização é feita buscando o mínimo da função objetivo SSQ ou SSQR. Os resultados fornecem simulações boas (“good”), ruins (“not good”) e a melhor (“best”).

1.7.2 Aplicações do SWAT

Na última década houve um grande aumento de aplicações do SWAT em vários países em estudos hidrológicos e ambientais de bacias agrícolas. Do ponto de vista da escolha do modelo algumas das suas vantagens podem ser destacadas, como: (i) modelo interdisciplinar, (ii) robustez e eficiência computacional, (iii) software de domínio público e código aberto, (iv) suporte e constante aperfeiçoamento, (v) funcionalidades do ambiente SIG, (vi) estudos de cenários de cobertura/uso do solo atuais e futuros, (vii) grande número de alternativas de operações agrícolas (manejo), e (viii) qualidade da água. Todos os fatores citados reforçam o potencial do SWAT, confirmado pela quantidade de artigos publicados anualmente em revistas, jornais e periódicos científicos (GASSMAN et al., 2007; KRYSANOVA; ARNOLD, 2008).

Gassman et al. (2007) agruparam 261 aplicações do SWAT em estudos hidrológicos, estudos de qualidade, ou ambos, separando-as, em: (i) calibração e/ou análise de sensibilidade (14,1%), (ii) impacto de mudanças climáticas (11,4%), (iii) descrições das interfaces SIG (3%), (iv) estimativas hidrológicas (16%), (v) variações na configuração ou efeitos dos dados de entrada (13,6%), (vi) comparações com outros modelos ou técnicas (5%), (vii) interfaces com outros modelos (12,9%), e (viii) transporte de poluentes (24%).

Gassman, Sadeghi e Srinivasan (2014) analisaram 22 artigos apresentados no *2011 Conference & Workshops*, realizado na Espanha. Neste evento foram apresentados 160 trabalhos científicos de 37 países sobre o SWAT. Em praticamente todos os estudos havia algum nível de testes hidrológicos, sendo a maioria com foco em um ou mais indicadores ambientais. Mereceu menção o artigo brasileiro (Bonumá et al., 2014) em aplicação do SWAT2009 sobre a simulação do transporte de sedimentos na bacia do rio Arroio Lino, com 4,8 km², no Sul do Brasil. Em geral, as simulações hidrológicas incluíam uma ou mais das etapas de análise de sensibilidade e/ou análise de incertezas, calibração manual e/ou automática com posterior validação, e medidas estatísticas e/ou gráficos para avaliação dos resultados. Do estudo realizado pelos autores foram destacadas as seguintes informações sobre os indicadores do desempenho:

- a) Os coeficientes de determinação (R^2) e Nash-Sutcliffe (NSE) foram os mais usados para avaliação dos modelos. Muitos estudos relataram a tendência percentual bias (PBIAS). A maioria dos estudos citaram Moriasi et al. (2007) em relação aos critérios usados para análise dos resultados com base nos indicadores estatísticos.
- b) A abordagem diária compreendendo a calibração e validação foi considerada em dez estudos para o R^2 , e em 22, para o NSE. A mesma relação foi verificada para avaliações mensais e um número pequeno para anual. Em geral, os resultados excederam 0,50 para o NSE. Os melhores resultados corresponderam aos intervalos anual e mensal. Contudo, em mais da metade dos estudos diários foram verificados bons resultados, confirmando a tendência no aumento dessas aplicações.
- c) Vários estudos replicaram satisfatoriamente ou com acurácia os dados observados. Em muitos casos os picos de vazão foram subestimados. Em alguns, o modelo superestimou os picos de vazão, apresentou baixa representatividade da sazonalidade das respostas aos eventos e baixa acurácia nas vazões de estiagem. Em outros, houve problemas relacionados com as entradas, como falta de precisão espacial e/ou temporal dos dados de precipitação, resolução do MDE e incertezas sobre os parâmetros de uso e solo. No caso do MDE a resolução pode influenciar a aplicação, especialmente aquelas que avaliam as perdas por erosão e transporte de sedimentos.

Gassman, Sadeghi e Srinivasan (2014) concluíram que o SWAT é uma ferramenta eficaz em diversas aplicações sobre recursos hídricos e manejo do solo. Além disso, salientaram que o modelo tem tido suporte de instituições governamentais nos EUA e do setor privado responsável por um número crescente de aplicações e adaptações espalhadas pelo mundo. Com relação às fraquezas sugeriram a ampliação dos testes e avaliações e/ou aperfeiçoamento do modelo, assim como mais estudos para considerar o método de infiltração Green & Ampt, que requer dados subdiários de precipitação, e questões relacionadas com calibração e validação para se evitarem esforços que considerem ajustes de número exagerado de parâmetros. E também a realização de pesquisas para se estabelecerem critérios de avaliação estatística na mesma linha desenvolvida por Moriasi et al. (2007).

1.7.3 SWAT no Brasil

Garbossa et al. (2011) com base em 70 aplicações acadêmicas do SWAT no Brasil em 1999-2010 identificaram 60 casos de estudos sobre vazão, sedimento e qualidade. Independentemente das diferenças entre as bacias hidrográficas simuladas quanto ao tamanho, condições topográficas e clima concluíram que o desempenho do modelo foi considerado bom, podendo ser usado nos processos de suporte à decisão por órgãos municipais, comitês de bacias, organizações ambientais e instituições federais. No entanto, relataram que isso não acontece, porque a maior dificuldade deve-se principalmente à falta de dados a respeito das bacias.

Garbossa et al. (2011) destacaram que a maior parte dos estudos verificou a capacidade do modelo em representar adequadamente as respostas hidrológicas dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas. A razão para que as aplicações estivessem voltadas mais para testes deveu-se à carência de séries de vazões e de qualidade da água. Os artigos foram agrupados conforme as principais saídas, em: (i) nutriente, com 16%, (ii) sedimento, com 43%, e (iii) vazão, com 41%. Do total de artigos, 61% corresponderam a São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e o restante entre Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, Alagoas e Paraíba. Em sua maior parte foram realizados procedimentos de calibração e validação e usados os indicadores estatísticos R^2 e NSE em simulações principalmente anuais e/ou mensais. Em poucas situações por insuficiência de dados temporais não foram capazes de validarem os resultados.

Na Tabela 4 estão listadas algumas aplicações com os resultados dos indicadores estatísticos em bacias hidrográficas inferiores a 100 km² no Brasil, considerando o escopo desta dissertação em que a microbacia experimental tem área de 13,5 km². Estão relatados somente os desempenhos para vazão mesmo que a aplicação tivesse considerado os componentes sedimento ou nutriente.

Tabela 4 – SWAT no Brasil em bacias menores do que 100 km² (2003-2010)

Referência	Ano	Localização	UF	Área da bacia (km ²)	Aplicação	Indicadores na calibração
Machado et al.	2003	Rio Marins	SP	59,73	Vazão	NSE = 0,92 e R ² = 0,94 (mensal)
Bittencourt e Gobbi	2006	Rio Piraquara	PR	58,00	Vazão	R ² = 0,82 (anual)
Paiva e Paiva	2006	Rio Menino Deus I	RS	18,00	Vazão	R ² = 0,54 (diário) NSE = 0,88 e R ² = 0,88 (mensal)
Lopes e Kobyama	2008	M2 Experimental	SC	8,56	Vazão	NSE = 0,23 e R ² = 0,51 (diário)
Marchioro	2008	Rio Santa Maria	RJ	13,50	Vazão	NSE = 0,72 (mensal)
Lubitz	2009	Rio Concórdia	---	30,74	Vazão	NSE = 0,88 (mensal)
Uzeika	2009	Arvorezinha	RS	1,19	Vazão	NSE = 0,84 (mensal)
Baltokoski et al.	2010	Rios Conrado e Pinheiro	PR	52,97	Vazão	NSE = 0,70 (mensal)
Blainski et al.	2010	Rio Lajeado dos Fragosos	PR	59,00	Vazão	NSE = 0,73 (mensal)
Bonumá et al.	2010	Arroio Lino	RS	3,20	Vazão	NSE = 0,87 e R ² = 0,90 (mensal/validação)
Garbossa et al.	2010	Rio Lajeado dos Fragosos	PR	59,00	Vazão	NSE = 0,73 (mensal)

Fonte: GARBOSSA et al., 2011.

Garbossa et al. (2011) relataram que não foram encontrados no Brasil documentos a respeito de aplicações de cunho prático, embora algumas instituições públicas e privadas usassem o SWAT para tomada de decisão sobre erosão do solo e transporte de sedimentos. Em relatórios de empresas da área de energia hidrelétrica em estudos de transporte de sedimentos e qualidade foram verificadas recomendações para o uso do SWAT.

Com relação às pesquisas realizadas com o SWAT no Brasil nos anos de 2011-2013 constavam no *SWAT Literature Database* 18 artigos. Desse total, dez foram publicados em revistas estrangeiras. Os trabalhos invariavelmente consideraram o componente de vazão nos estudos e aplicações relacionadas com a perda e transporte de sedimentos, calibração, sensibilidade e/ou análise de incerteza, estimativas hidrológicas, mudanças climáticas e impactos no uso do solo.

2 METODOLOGIA

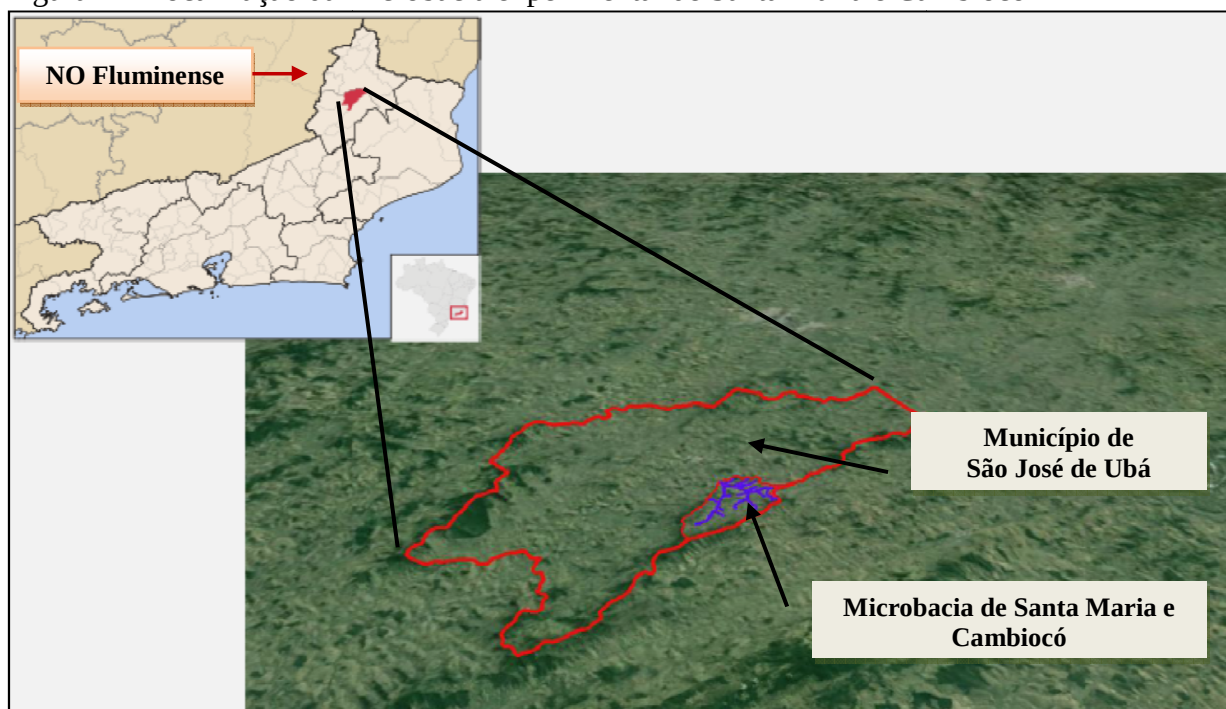
2.1 Caracterização da área de estudo

2.1.1 Localização geográfica

A área de estudo corresponde à microbacia experimental e representativa de Santa Maria e Cambiocó, com 13,5 km², localizada entre as latitudes 21°22'S e 21°26'S e longitudes 41°53'W e 41°57'W, em São José de Ubá, na região Noroeste Fluminense (Figuras 2 e 3). O município com 251,5 km², situado a 290 km da cidade do Rio de Janeiro, é cortado pela RJ-186, principal rodovia estadual que interliga as cidades de Pirapetinga (MG) e Bom Jesus do Itabapoana (RJ).

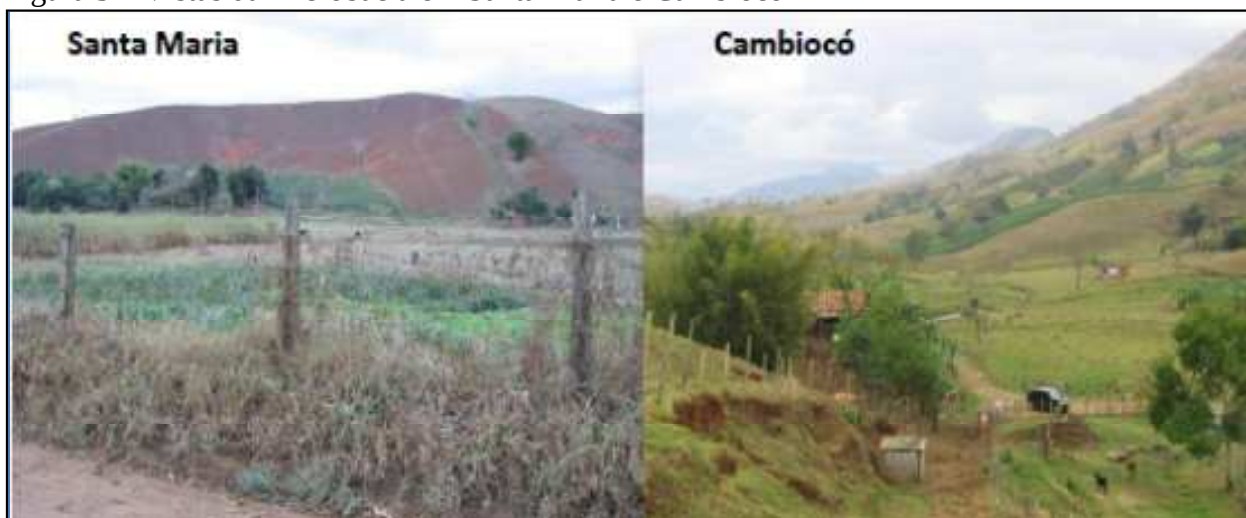
Além de São José de Ubá, desmembrado de Cambuci em 1995, a região Noroeste Fluminense com 5.388 km² abrange os municípios de Aperibé, Bom Jesus de Itabapoana, Cambuci, Italva, Itaocara, Itaperuna, Laje do Muriaé, Miracema, Natividade, Porciúncula, Santo Antônio de Pádua e Varre-Sai.

Figura 2 – Localização da microbacia experimental de Santa Maria e Cambiocó



Fonte: O autor, 2014.

Figura 3 – Vistas da microbacia em Santa Maria e Cambiocó



Fonte: MORAES, 2007.

2.1.2 Aspectos gerais

O relevo de São José de Ubá apresenta dois tipos distintos de formação. Uma parte, por morros rebaixados e arredondados em decorrência dos processos erosivos que desgastaram gradativamente o terreno, dando origem a vales encaixados nas linhas de falhas e algumas baixadas. A outra, por relevo ondulado com escarpas íngremes e altitudes que chegam a 930 metros na divisa com o município de Miracema.

Segundo Lumbreras et al. (2006) a ocorrência de solos do Noroeste Fluminense está ligada às feições geomorfológicas regionais. Nas áreas mais baixas de várzeas os solos são representados por Gleissolos e Cambissolos. Nas mais elevadas, onde ocorrem os sedimentos coluvionares e colúvio-aluvionares, por Planossolos. Nos morros predominam os Argissolos Vermelhos-Amarelos que gradam para Neossolos Litólicos nos relevos mais acentuados associados aos afloramentos rochosos.

O clima do Noroeste Fluminense é o tropical semiúmido com estação chuvosa (verão), entre outubro a abril, e estação seca (inverno), entre maio a setembro. A distribuição das chuvas é irregular ao longo do ano com total da ordem de 1.200 mm. As baixas altitudes dos morros não favorecem o barramento das nuvens de frentes frias nos meses mais críticos de estiagem. As temperaturas variam entre a mínima de 15°C e a máxima de 40°C com temperatura média anual de 25°C (MARTORANO et al. 2003).

A hidrografia de São José de Ubá é constituída de pequenos córregos, em sua maioria de primeira ordem, entre eles os de Santa Maria e Cambiocó que formam a microbacia estudada. O córrego de Cambiocó nasce na parte mais elevada e deságua na metade da extensão do córrego de Santa Maria que nasce na área ondulada. Os córregos fazem parte pela margem direita da sub-bacia do rio São Domingos, afluente do rio Muriaé, que juntamente com o rio Pomba compõem os principais sistemas de drenagem no trecho baixo do rio Paraíba do Sul. O município ocupa 86% da sub-bacia do rio São Domingos, que tem área de 280 km², o restante corresponde ao município de Itaperuna (MORAES, 2007).

Os aquíferos do cristalino contribuem para a sub-bacia do rio São Domingos. As fraturas seguem a orientação regional no sentido NNW-SSE/NE-SW. As rochas são recobertas pelos depósitos aluvionares quaternários e solos, formando o aquífero poroso pouco espesso e irregular da ordem de 2 a 12 metros ao longo das principais drenagens. Na estiagem o escoamento de base regional é controlado pelo sistema subterrâneo que é abastecido nas zonas de recarga (LIMA, 2009).

2.1.3 Aspectos socioeconômicos

A população aferida em São José de Ubá em 2010 pelo IBGE era de 7.003 habitantes. Em 2004, o censo realizado pela Embrapa Solos em algumas comunidades do município estimou nas vilas de Santa Maria e Cambiocó 448 e 224 pessoas, respectivamente, em 211 domicílios. A estrutura fundiária é constituída por pequenas propriedades rurais em que mais de 90% têm até 30 ha. A Figura 4 mostra os trechos urbanizados das duas comunidades.

Figura 4 – Comunidades de Santa Maria e Cambiocó



Fonte: MORAES, 2007.

Assim como as demais áreas do Noroeste Fluminense São José de Ubá foi ocupado por sucessivos ciclos de monoculturas e plantio de subsistência. Como consequência da retirada da cobertura original da mata atlântica, das práticas agrícolas inadequadas com sistemas de manejo do solo de baixo nível tecnológico e da pecuária extensiva várias alterações foram provocadas no ambiente, entre elas a erosão com perda de solos, impermeabilização e assoreamento e/ou desaparecimento de córregos, o que resultou em mudança significativa na oferta hídrica para consumo humano e irrigação. Vale salientar que no trecho fluminense da região hidrográfica do rio Paraíba do Sul existem 19 municípios com menos de 5% de cobertura florestal, entre os quais Aperibé, Italva e São José de Ubá, que não têm sequer um hectare de mata nativa e contam apenas com alguns hectares de vegetação secundária representadas por pastagens e capoeiras (GEPARMBH, 2003).

A partir do declínio da cafeicultura na década de 1930 a pecuária passou a ser a principal atividade do Noroeste Fluminense com seu caráter extensivo, reduzida mão de obra e baixos investimentos. Atualmente, as atividades rurais em São José de Ubá são essencialmente a cultura de olerícolas, nas áreas de baixada e encostas, e a pecuária leiteira. O plantio do tomate iniciado na década de 1960 tornou-se predominante entre os produtores rurais, sendo a base da economia do município, segundo maior produtor do estado. Desde então, a economia, a vida social e política da localidade giram em torno da produção e comercialização do tomate.

Com exceção da sede municipal com abastecimento de água garantido por captação no rio Muriaé, o restante da população de São José de Ubá depende dos poços tubulares profundos e poços manuais de pouca profundidade. O consumo de água para irrigação nos meses de inverno prejudica a oferta hídrica entre os usuários, causando conflitos entre os demais usos. Em 1999, o município registrou situação crítica devido ao impacto da estação seca, tendo sido decretado estado de calamidade pública.

Moraes (2007) destaca que a situação atual da oferta hídrica na microbacia experimental é pressionada pelo plantio do tomate no período crítico de estiagem de maio a agosto. Nesta época são construídos pequenos barramentos de água para irrigação. Esta prática recorrente potencializa as taxas potenciais de evaporação. Entre outras medidas sugere com foco na sustentabilidade que sejam escolhidos métodos mais econômicos à prática agrícola.

Noronha, Pimentel da Silva e Hora (2013) na avaliação dos usos consuntivos na microbacia experimental no período de 2005/2006 consideram que a irrigação do tomate é caracterizada pelo uso ineficiente dos recursos hídricos mesmo para chuvas com volume suficiente para suprir a cultura. Com base nos dados levantados salientam que o aprimoramento das técnicas de irrigação permitiria uma grande redução do volume de água captada em pelo menos 60 dias do total de 91 dias de cultivo do tomate. Além disso, alertam que nos meses secos as variações de evapotranspiração e chuva atuam de maneira sinérgica no incremento do consumo de água. As precipitações em 2006, inferiores às ocorridas no ano de 2005, podem ter sido responsáveis pelas baixas expressivas nas vazões médias mensais até os valores nulos observados. Com relação às culturas de verão recomendam a realização do balanço entre a evapotranspiração, precipitação e volume de água armazenado no solo.

2.1.4 Solos da microbacia

Bhering et al. (2005) definiram a partir do levantamento dos solos realizado pela Embrapa Solos na microbacia experimental nove unidades de mapeamento, agrupadas como: (i) Cambissolo Háplico léptico (CXbe2, CXve2, CXve3), (ii) Cambissolo Háplico lítico (CXbe1), (iii) Cambissolo Háplico gleico (CXve1), (iv) Argissolo Vermelho-Amarelo (PVAd e PVAe), (v) Neossolo Litólico (RLve), e (vi) Gleissolo Háplico (GXve). Com relação à distribuição espacial os Cambissolos Háplicos lépticos e líticos cobrem 44%, os Argissolos Vermelho-Amarelos, 18,5%, os Neossolos Litólicos, 16,7%, e os demais, incluindo os afloramentos rochosos, 20,8%. A maior parte dos solos é de pequena espessura. Na área de baixada, mais propícia às lavouras, predominam os Cambissolos Háplicos gleicos e os Gleissolos. Nos terrenos de topografia ondulada predominam os Cambissolos Háplicos lépticos, Argissolos Vermelho-Amarelo e Neossolos Litólicos, e junto aos divisores de águas os Neossolos Litólicos são predominantes (OTTONI, 2005).

Otoni (2005) realizou estudos na microbacia experimental com vistas à classificação dos perfis representativos das principais classes de solos do levantamento da Embrapa Solos, aplicando a metodologia de classificação SCFH e comparando-a com a SiBCS. O trabalho consistiu na determinação das variáveis físico-hídricas com a realização de testes de capacidade de campo e infiltração *in situ*. As amostragens corresponderam às profundidades até 50 cm para solos truncados por rochas ou lençol freáticos, e até 70 cm, se não havia truncamento.

2.1.5 Estudo hidrológico da microbacia

Moraes (2007) realizou no período de abril/2005 a agosto/2006 o monitoramento hidrometeorológico no exutório da microbacia experimental. As variáveis observadas corresponderam ao nível de água, precipitação, temperatura e sólidos suspensos. Foi construído um vertedor para os níveis de água correspondentes às vazões mínimas até 119 L/s e a montante uma ponte para medir valores maiores. Desse estudo a maior vazão média mensal calculada para o mês de dezembro/2005 correspondeu a 293 L/s. Nos meses de junho, julho e agosto/2006 foram registradas vazões nulas. Nos demais meses as vazões ficaram abaixo de 106 L/s, predominando valores inferiores a 84 L/s. A magnitude das vazões é uma característica da resposta hidrológica na microbacia em que a manutenção dos níveis mínimos de vazão está associada à contribuição do lençol freático a partir do aquífero fissural que ocorre na região.

Além do monitoramento hidrossedimentológico Moraes (2007) estudou o balanço hídrico e a disponibilidade hídrica na microbacia experimental. A análise do balanço hídrico com base na aplicação dos princípios de conservação de massa mensal considerou os totais pluviométricos, evaporimétricos e vazões médias observadas para determinação do armazenamento de água, uma vez que não foi monitorada a umidade no perfil dos solos e a variação dos níveis piezométricos de poços em testes de bombeamento. Os resultados apontaram déficit hídrico na maior parte do período avaliado, estimado em cerca de 320 mm anuais, valor coerente com outros estudos na região Noroeste Fluminense, especialmente nos municípios de Itaperuna e Santo Antonio de Pádua.

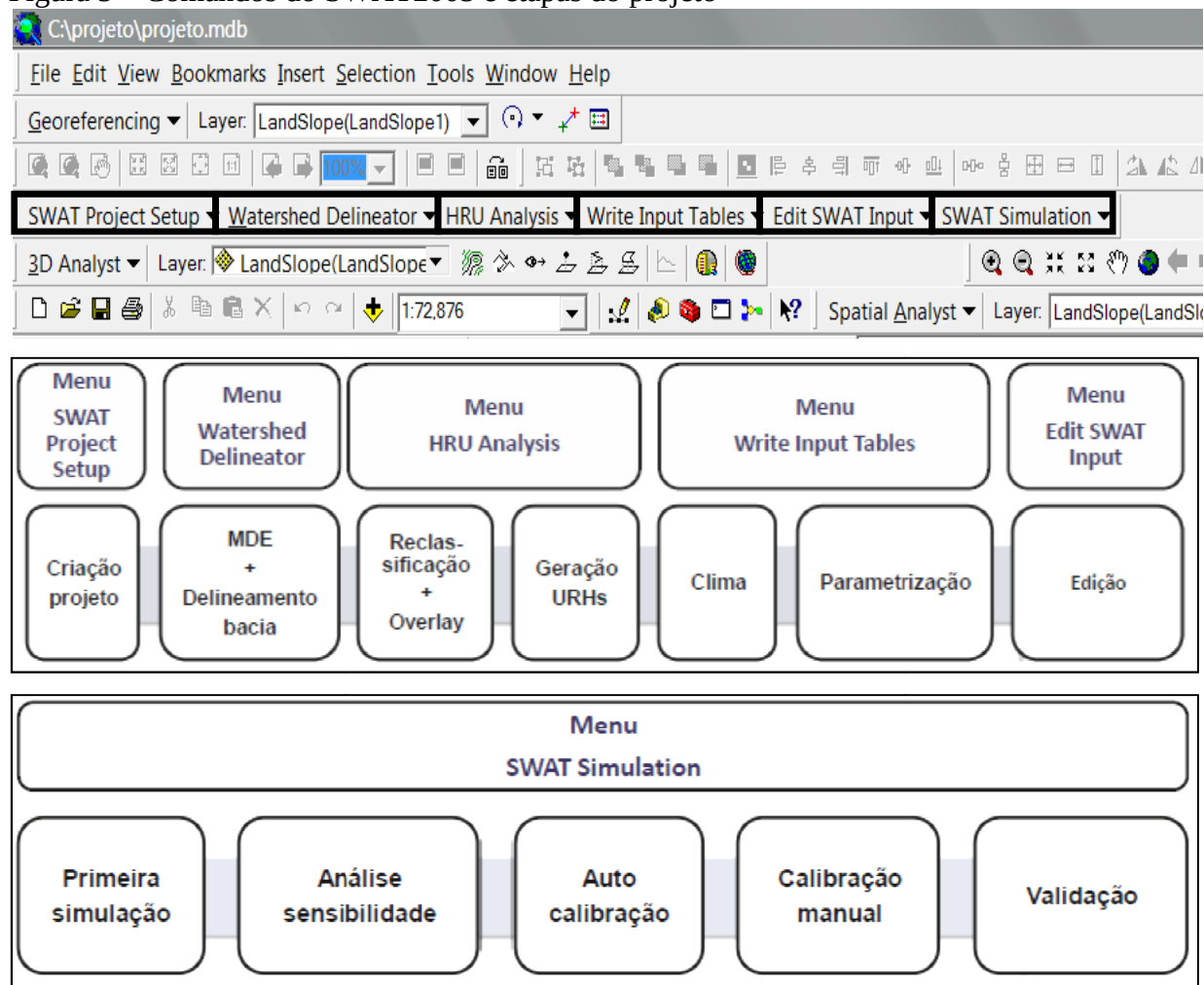
2.2 **Desenvolvimento do projeto**

Os procedimentos de criação, desenvolvimento, simulação e ajustes do modelo hidrológico com os dados da microbacia experimental para o período observado de chuvas e vazões de abril/2005 a agosto/2006 são descritos a seguir, conforme as orientações em Winchell et al. (2007), no *ArcSWAT Interface for SWAT 2005 – User's Guide* para implementação de um projeto SWAT.

2.2.1 Instalação da interface

A versão SWAT2005 em que se baseou o presente estudo corresponde à extensão ArcSWAT 2.3.4 para o software ArcGIS 9.3 SP1 da ESRI. A extensão foi instalada em ambiente operacional compatível com o Windows XP. O modelo foi acoplado ao aplicativo ArcMap (ArcGIS/ESRI) por meio da habilitação das extensões *SWAT Project Manager* e *SWAT Watershed Delineator*. A extensão *Spatial Analyst* (ArcGIS) também foi necessária para o processamento dos planos de informação no formato *raster*. A Figura 5 mostra o “menu de comandos” do SWAT2005 no aplicativo ArcMap e as etapas do desenvolvimento do projeto SWAT.

Figura 5 – Comandos do SWAT2005 e etapas do projeto



Fonte: WINCHELL et al., 2007.

2.2.2 Criação do projeto SWAT2005

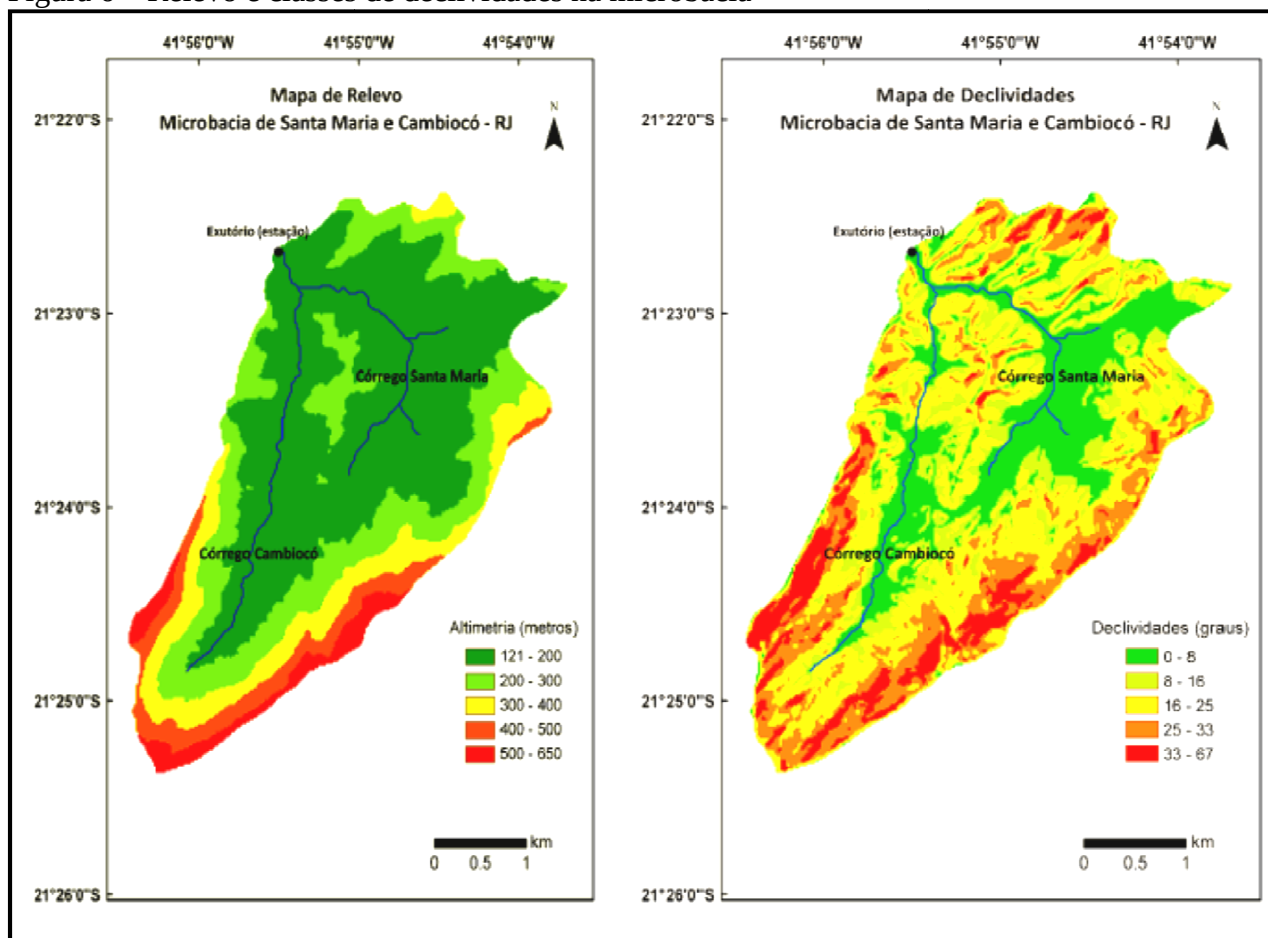
Inicialmente, o “diretório de trabalho” do projeto SWAT foi criado no diretório (C:\) do Windows. No ambiente ArcMap-SWAT2005 foram feitas as associações com as localizações (“*paths*”) dos seguintes elementos do modelo: (i) *Project Directory* – “diretório de trabalho” do projeto criado no diretório raiz (C:\), (ii) *SWAT Project Geodatabase* – geodatabase que o modelo gera com o mesmo nome do “diretório de trabalho” para armazenar os arquivos parametrizados do projeto, (iii) *Raster Storage Geodatabase* – geodatabase que o modelo gera com o nome “RasterStore” para armazenar os planos de informação *raster* inseridos e gerados durante o desenvolvimento do projeto, e (iv) *SWAT Parameter Geodatabase* – geodatabase denominado SWAT2005 (C:\Arquivo de Programas\SWAT) que deve ser copiado preferencialmente para o “diretório de trabalho”. Depois das associações o mapa-documento ArcMap foi salvo no “diretório de trabalho”, que teve a função de manter todos os dados de entrada, processados e de saída do projeto.

2.2.3 Delineamento da microbacia

Nesta etapa foi extraída a rede drenagem e delineada a microbacia experimental a partir do MDE com resolução 19 metros, gerado anteriormente com os dados correspondentes aos limites da área, pontos cotados e curvas de nível do levantamento topográfico na escala 1:10.000 realizado pela Embrapa Solos. O processamento do MDE criou a superfície numérica de direção de fluxo acumulado. Foi adotado como área mínima de drenagem 15 ha. Este valor pouco menor do que o sugerido pela interface (25,8 ha) visou manter o padrão similar ao mapa de hidrografia. A rede de canais gerada formou segmentos e junções (“*outlets*”). Coube então decidir sobre a complexidade do esquema que se pretendia para a microbacia, uma vez que se fossem mantidas as junções seriam formadas algumas sub-bacias. Na verdade, por ser uma área com predomínio de um único tipo de cobertura (pastagem) e não serem consideradas as atividades agrícolas, a opção foi não dividi-la, fixando-se apenas o exutório. Este critério resultou na delimitação de uma única sub-bacia e do canal principal.

A Figura 6 mostra os mapas do relevo e declividades com os dois córregos da microbacia experimental. O relatório forneceu a distribuição detalhada das elevações com cotas que variaram entre 120 m e 650 m e altitude média em torno de 230 m.

Figura 6 – Relevo e classes de declividades na microbacia



Fonte: O autor, 2014, com os dados do GEPARMBH (2003).

2.2.4 Reclassificação e definição das URHs

Nesta etapa foram realizados os seguintes procedimentos: (i) reclassificação dos planos de informação de cobertura/uso do solo, solos e declividades, (ii) sobreposição (“*overlay*”) e (iii) definição das URHs.

Antes da reclassificação foi necessário fornecer os parâmetros de cobertura/uso do solo e dos solos. Com relação ao uso do solo não foram consideradas as atividades agrícolas, mas somente a cobertura predominante (pastagem). Os dados foram providos pela base *Land cover/Plant growth database* fornecida pelo modelo. Os parâmetros de “pastagem” constam da Tabela 14 (APÊNDICE B).

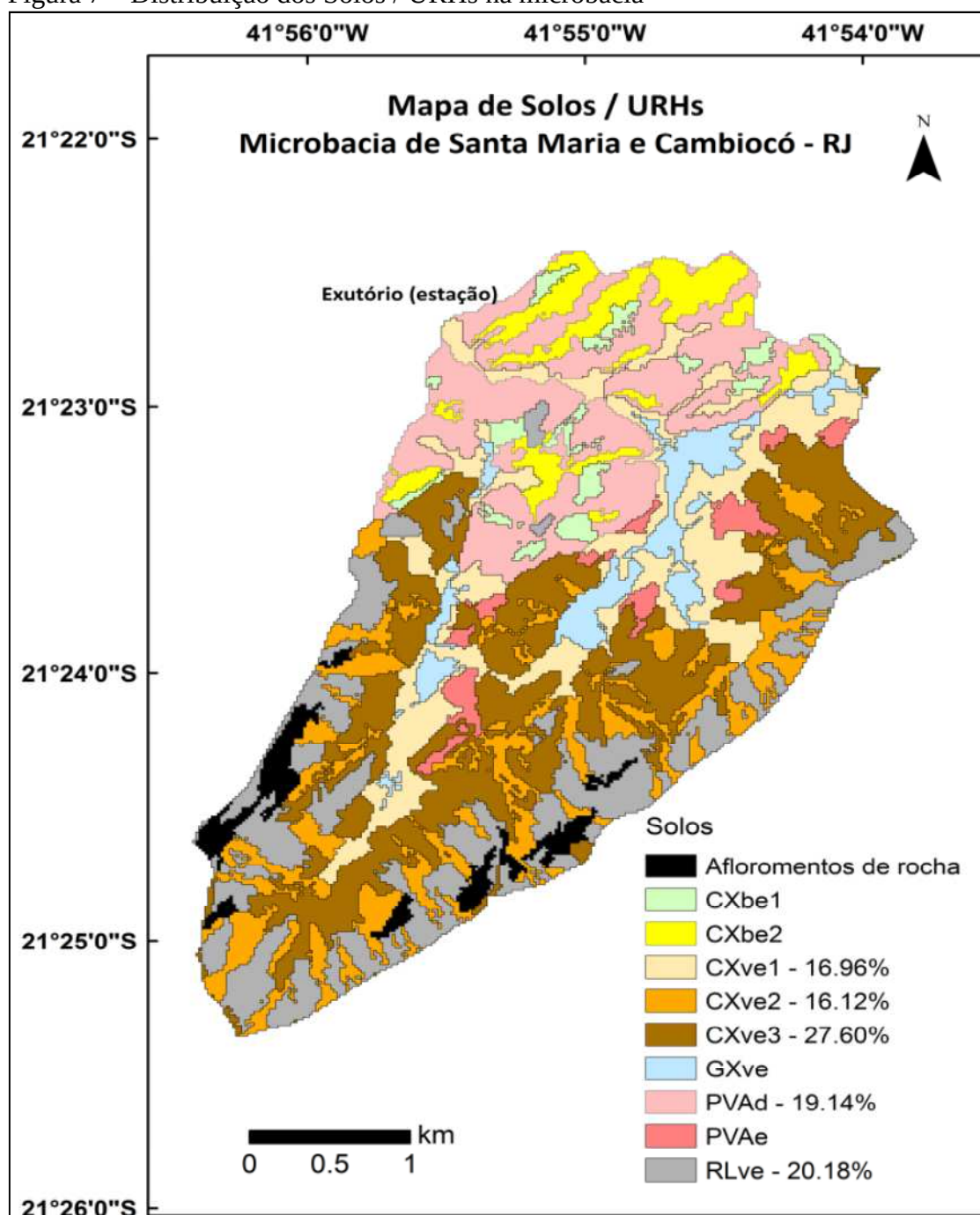
Os dados dos solos corresponderam aos levantamentos (Embrapa Solos, 2003 e Ottoni, 2005) realizados na microbacia experimental. A composição pedológica foi adaptada com a reunião dos perfis de solos que tinham a mesma distribuição espacial das unidades mapeadas por Bhering et al. (2005). As camadas superiores corresponderam aos dados de Ottoni (2005), com profundidade de 50 cm, se o solo estava truncado por rocha, e de 70 cm, se não havia truncamento. As camadas inferiores corresponderam aos dados da Embrapa Solos. A preferência pelos dados de Ottoni (2005) até a profundidade de 50-70 cm deveu-se a terem sido feitos testes *in situ* a tensões específicas que forneceram valores da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, usados para calcular o conteúdo de umidade do solo, um dos parâmetros de entrada. No caso das camadas inferiores da Embrapa Solos foram calculados por equações de pedotransferência. Em ambos os perfis a condutividade hidráulica saturada foi calculada pelo método Rawls e Brakensiek. Os dados que foram inseridos na base *User soils database* constam da Tabela 15 (APÊNDICE C).

Depois que as bases de dados de cobertura e dos solos estavam criadas no projeto foram inseridos os respectivos planos de informação e reclassificados em cada caso para ligar as classes temáticas ao esquema delineado da microbacia experimental (no caso com uma única sub-bacia) na etapa anterior, bem como aos respectivos dados. O plano de declividades foi gerado a partir do MDE com a definição de uma única classe de declividade e reclassificado. O critério visou diminuir o número de URHs na etapa seguinte para simplificar a parametrização do modelo. A possibilidade de fazer ajustes posteriormente a fim adequar os parâmetros relacionados com a topografia também determinou essa escolha.

O passo seguinte foi a sobreposição dos três planos de informação reclassificados, seguido da definição das URHs. O critério para eliminação de classes minoritárias foi definido somente para os solos, uma vez que só havia uma classe de cobertura e uma de declividade. Foram eliminadas as classes de solos menores do que 6% e dos afloramentos de rochas da ordem de 3%, mantendo-se as demais. A consideração para eliminação do percentual de até 6% prevaleceu em razão de que as variações dos parâmetros físico-hídricos dos solos na microbacia experimental não eram significativas e não afetariam significativamente os resultados na simulação. O processo terminou com a distribuição das áreas eliminadas entre as remanescentes de acordo formulação matemática ponderada usada pelo modelo.

As classes remanescentes dos solos passaram a abranger os seguintes percentuais da microbacia experimental: (i) Cambissolo Háplico gleico (CXVe1-16,9%), (ii) Cambissolo Háplico léptico (CXVe2-16,1% e CXVe3-27,6%), (iii) Argissolo Vermelho-Amarelo (PVAd-19,1%), e (v) Neossolo Litólico (RLVe-20,1%). A distribuição das classes de solos correspondeu exatamente as cinco URHs geradas e mostradas na Figura 7. A coincidência deveu-se aos critérios mencionados.

Figura 7 – Distribuição dos Solos / URHs na microbacia



Fonte: O autor, 2014, com os dados do GEPARMBH (2003).

2.2.5 Dados climáticos e parametrização

Nesta etapa foram associadas as localizações das estações de precipitação e do gerador de clima com os respectivos dados. Os dados de precipitação medidos em intervalo de 15 minutos corresponderam à série monitorada por Moraes (2007) no período de abril/2005 a agosto/2006. Em razão da curta extensão da série temporal houve a necessidade de considerar um período de aquecimento na execução, tendo sido por isso replicados os dados de chuva correspondentes ao período de 01/04/2005 a 31/03/2006, que foram incorporados à tabela de precipitação. Em vários estudos como em Blainski e Garbossa (2009) tem sido recomendado o aquecimento de um até cinco anos para que se atinja um patamar de equilíbrio dos processos hidrológicos que garantam melhores resultados na simulação. Neitsch et. (2004) consideram adequado o período de um ano de aquecimento para simulações com menos de cinco anos.

O *User weather stations database* usado pelo gerador de clima é uma base obrigatória do modelo. Os seus dados foram providos com valores médios mensais das variáveis climáticas representativas para a área de estudo (APÊNDICE D, Tabela 16). Essa base substituiu as variáveis meteorológicas que não foram fornecidas. Os dados estatísticos mensais foram calculados de acordo com os seguintes critérios:

- a) *Temperatura máxima; temperatura mínima e desvio padrão; precipitação e desvio padrão; coeficiente de assimetria da precipitação; probabilidade de um dia úmido acontecer depois de um dia seco; probabilidade de um dia úmido acontecer depois de um dia úmido; e temperatura do ponto de orvalho* – série de 20 anos (1990-2010) da estação climática do INMET de Itaperuna, representativa pela proximidade e condições fisiográficas similares ao município de São José de Ubá. Os dados foram calculados com o aplicativo WGN Excel Macro. A temperatura do ponto de orvalho foi calculada com o aplicativo Program dew02.exe.
- b) *Chuva máxima de 30 dias* – série de precipitação de Moraes (2007).
- c) *Radiação solar total* – radiação solar recebida no topo da atmosfera nas latitudes 20S e 22S (TUCCI, 2004).
- d) *Velocidade do vento* – série de 2004-2008 da estação climática do INMET de Itaperuna.

Depois da definição dos dados meteorológicos foi realizada a parametrização por meio do comando *Write all* com a criação dos arquivos parametrizados *Input files*. O processo estruturou a base de dados com as devidas especificações e formatos necessários à execução do modelo. Os parâmetros relacionados com as características topográficas da microbacia experimental, como declividades e dimensões dos canais, foram gerados a partir do MDE. Os dados de cobertura, solos e clima forneceram os parâmetros correspondentes. No caso dos demais arquivos parametrizados sem dados fornecidos na etapa inicial (correspondentes ou não à aplicação) o modelo considerou valores padrões. O modelo é parametrizado com todos os arquivos *Input files* independentemente dos parâmetros fazerem ou não parte da aplicação.

2.2.6 Edição dos dados

Nesta etapa foram definidos os parâmetros correspondentes aos processos relevantes da aplicação que ainda não estavam disponíveis. Foi usado o aplicativo Baseflow filter para determinação daqueles relacionados com o escoamento de base, usando a série de vazões observadas de novembro/2005 a agosto/2006. Com relação à evapotranspiração potencial sem dados fornecidos foi definido o método de cálculo Hargreaves, uma vez que introduziria menos incertezas à geração do clima com uma única variável climática (temperatura) entre aquelas constantes do gerador de clima. Com relação ao método de cálculo do escoamento superficial foi definida a equação de infiltração de Green & Ampt. Os parâmetros geomórficos gerados para topografia e dimensões dos canais foram mantidos. O parâmetro CN2, que é muito importante, porque está associado às condições iniciais do solo que impactam o escoamento superficial, foi definido com o valor “69”. Esse valor correspondeu às relações entre o uso do solo, que considerou a cobertura “pastagem”, o grupo hidrológico do solo “B” com “moderada taxa de infiltração” e a condição hidrológica “regular”. A estimativa do CN2 foi conservadora para a situação real dos solos na microbacia experimental, que são desprovidos de cobertura e sujeitos a longo termo de ações não conservacionistas, além de que uma parte da área tem como característica declividades altas e os valores Curva Número estarem padronizados para declividades de 5%. As Tabelas 17 a 23 listam os valores dos parâmetros usados na modelagem de acordo com os respectivos arquivos parametrizados (APÊNDICE E). Ao final, por meio do comando *Rewrite SWAT Input files*, o modelo foi reparametrizado com a finalidade de reorganizar os dados do sistema SWAT no formato necessário a sua execução.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Primeira simulação

Nesta etapa (antes da calibração) foi realizada a primeira simulação, que considerou um período de aquecimento de 01/04/2004 a 30/10/2005 associado ao período de calibração, de 01/11/2005 a 28/08/2006, ficando o período restante da série temporal de precipitação de 19/02/2006 a 28/08/2006 para validação do modelo. Essa separação deveu-se à disponibilidade de dados sem falhas da série de vazão observada, considerando que ambos os períodos (calibração e validação) abrangessem os meses com níveis de precipitação compatíveis, essencial para comparação posterior dos resultados das vazões ajustadas e validadas. O método de infiltração de Green & Ampt para geração do escoamento superficial tinha sido definido na etapa de edição, em razão do intervalo subdiário das chuvas monitoradas. A curta série de dados viabilizou este estudo em razão da quantidade dos eventos subdiários que foram processados para simular as saídas diárias de vazões e dos demais componentes hidrológicos. Os principais dados relativos à parametrização da microbacia experimental constam dos Apêndices B, C, D e E.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da primeira simulação. Os valores dos indicadores estatísticos com base em Moriasi et al. (2007) mostraram boa correlação em R^2 , mas foram apenas satisfatórios para NSE, PBIAS e RSR, indicando que mesmo tendo sido usado um período de aquecimento houve incertezas em relação aos parâmetros iniciais.

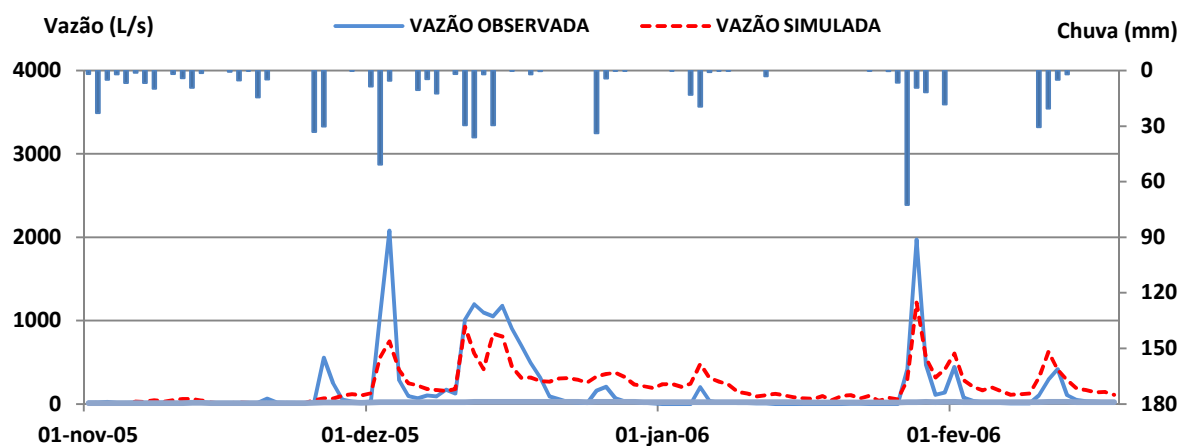
Tabela 5 – Resultados da 1ª simulação (antes da calibração)

Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
											R ²	NSE	PBIAS	RSR
609,5	625,4	326,9	174,3	212,4	70,6	123,7	350	19,4	1,4	0,0	0,66	0,59	21,82	0,64

Fonte: O autor, 2014.

A Figura 8 compara os hidrogramas observado/simulado da primeira simulação. Apesar da aderência entre as curvas ser baixa, confirmado por “NSE = 0,59”, o regime hidrológico mostrou a tendência das vazões simuladas acompanharem os eventos observados. Os picos de vazões entre as curvas mostraram esta sincronia. As vazões simuladas foram superestimadas com “PBIAS = 21,82” e resíduos entre as vazões altos com “RSR = 0,64”. De acordo com Moriasi et al. (2007) os três indicadores foram “satisfatórios”.

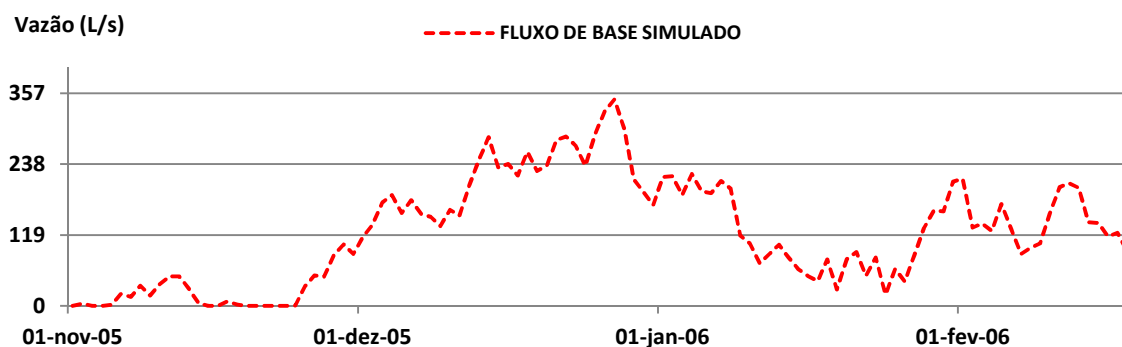
Figura 8 – Hidrogramas observado/simulado (1ª simulação)



Fonte: O autor, 2014.

A Figura 9 mostra o hidrograma do escoamento de base da primeira simulação. As médias diárias indicaram que o fluxo foi superestimado em comparação com as vazões observadas nos períodos em que os registros de precipitação foram baixos ou inexistentes.

Figura 9 – Hidrograma do escoamento de base simulado (1ª simulação)



Fonte: O autor, 2014.

A análise dos hidrogramas e indicadores de eficiência relativos à primeira simulação mostrou que os resultados não foram satisfatórios em termos da correlação, aderência e resíduos. Neste caso o modelo precisa ser calibrado até que se atinja o melhor ajuste. No entanto, antes de se avaliar a necessidade de calibração manual foram testadas as ferramentas disponibilizadas pelo SWAT 2005 para análise de sensibilidade e autocalibração.

3.2 Análise de sensibilidade

Com a finalidade de verificar os parâmetros mais significativos que influenciaram o processo chuva-vazão na microbacia experimental foi realizada a análise de sensibilidade. Os parâmetros avaliados foram todos os da Tabela 6. Nesta tabela o limite de existência refere-se aos valores que o parâmetro pode assumir, o intervalo de variação refere-se à faixa em que o parâmetro pode ser variado durante o teste, e o método de alteração refere-se à maneira como o valor do parâmetro é modificado, por um dos três métodos: substituição, adição, e multiplicação de porcentagem. O algoritmo usado pelo modelo para identificação dos parâmetros sensíveis foi o LH-OAT. A configuração considerada foi a seguinte:

- a) LH = 10 (valor padrão) – número de subfaixas (amostras) em que se divide o intervalo de variação do parâmetro;
- b) OAT = 0,05 (valor padrão) – valor incremental aplicado à amostra;
- c) O arquivo de vazões médias diárias observadas (denominado “floday.dat”) foi criado (em m³/s) para comparar as vazões simuladas com as observadas no período de 01/11/2005 a 18/02/2006;
- d) O período de aquecimento de 01/04/2004 a 30/10/2005 foi o mesmo usado na primeira simulação;
- e) A otimização dos parâmetros foi realizada por meio da vazão média diária simulada e das funções objetivo SSQ e SSQR.

Tabela 6 – Parâmetros que influenciam o processo chuva-vazão disponíveis na análise de sensibilidade do SWAT2005 (continua)

Parâmetro, processo	Descrição, limite de existência do parâmetro (unid.)	Faixa de variação, método de alteração	Influência do parâmetro na resposta hidrológica
ALPHA_BF Aquífero	Constante de recessão do escoamento de base 0,0001 – 1 (dias)	0 a 1 Substituição	Aumentá-lo implica aumentar a recarga do aquífero e o escoamento de base
GW_DELAY Aquífero	Tempo de retardo do aquífero raso 0 – 500	-10 a 10 Adição	Aumentá-lo implica aumentar o tempo para a água percolar para o aquífero raso
RCHRG_DP Aquífero	Fração de água que percola para o aquífero profundo 0 – 1 (mm)	0 a 1 Substituição	Aumentá-lo implica aumentar a fração de recarga para o aquífero confinado e diminuir o escoamento de base

Tabela 6 – Parâmetros que influenciam o processo chuva-vazão disponíveis na análise de sensibilidade do SWAT2005 (continuação)

Parâmetro, processo	Descrição, limite de existência do parâmetro (unid.)	Faixa de variação, método de alteração	Influência do parâmetro na resposta hidrológica
GW_REVAP Aquífero	Coefficiente de retorno da água para a zona não saturada 0,02 – 0,2	-0.036 a 0.036 Adição	Aumentá-lo implica aumentar o estoque de água no solo e diminuir o escoamento de base
GWQMN Aquífero	Profundidade mínima de água no aquífero raso para ocorrer o escoamento de base 0 – 5000 (mm H₂O)	-1000 a 1000 Adição	Aumentá-lo implica diminuir o escoamento de base
REVAPMN Aquífero	Profundidade mínima de água no aquífero raso para ocorrer “revap” 0 – 500 (mmH₂O)	-100 a 100 Adição	Aumentá-lo implica diminuir a ascensão de umidade para as camadas do solo e aumentar o escoamento de base
CN2 Escoamento superficial	Curva Número inicial para condições de umidade II 0 – 100	-25% a 25% Multiplicação	Aumentá-lo implica aumentar o escoamento superficial e diminuir o escoamento de base
SURLAG Escoamento superficial	Coefficiente que controla o atraso do escoamento superficial 1 – 24	0 a 10 Substituição	Aumentá-lo implica diminuir o tempo de concentração da bacia
HRU_SLP Tempo de concentração	Declividade média 0 – 0,6 (m/m)	-25% a 25% Multiplicação	Aumentá-lo implica aumentar o fluxo lateral e diminuir o tempo de concentração da bacia
SLSUBBSN Tempo de concentração	Comprimento médio da rampa de declividade 10 – 150 (m)	-25% a 25% Multiplicação	Aumentá-lo implica aumentar o tempo de concentração da bacia
CH_N2 Tempo de concentração	Coefficiente de Manning do canal principal -0,01 – 0,3	0 a 1 Substituição	Aumentá-lo implica aumentar o tempo de concentração da bacia
ESCO Evaporação	Fator de compensação da evaporação do solo 0 – 1	0 a 1 Substituição	Aumentá-lo implica aumentar a evaporação do solo e diminuir o escoamento superficial
EPCO Evaporação	Fator de compensação da remoção de água pelas raízes 0 – 1	0 a 1 Substituição	Aumentá-lo implica aumentar o estoque de água disponível para a remoção radicular
SOL_ALB Evaporação	Fração do albedo do solo na capacidade de campo 0 – 0,25	-25% a 25% Multiplicação	Aumentá-lo implica diminuir o impacto da elevação térmica nas camadas do solo e diminuir a taxa de evaporação
CANMX Evaporação	Interceptação máxima de água pelo dossel 0 – 100 (mm H₂O)	0 a 10 Substituição	Aumentá-lo implica aumentar a interceptação pelo dossel e diminuir o escoamento superficial
CH_K2 Canal	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal -0,01 – 500 (mm/hr)	0 a 150 Substituição	Aumentá-lo implica aumentar as perdas por transmissão
SOL_K Perfil do solo	Condutividade hidráulica saturada do solo 0 – 2000 (mm H₂O/hr)	-25% a 25% Multiplicação	Aumentá-lo implica aumentar a percolação e redistribuição de água no perfil do solo

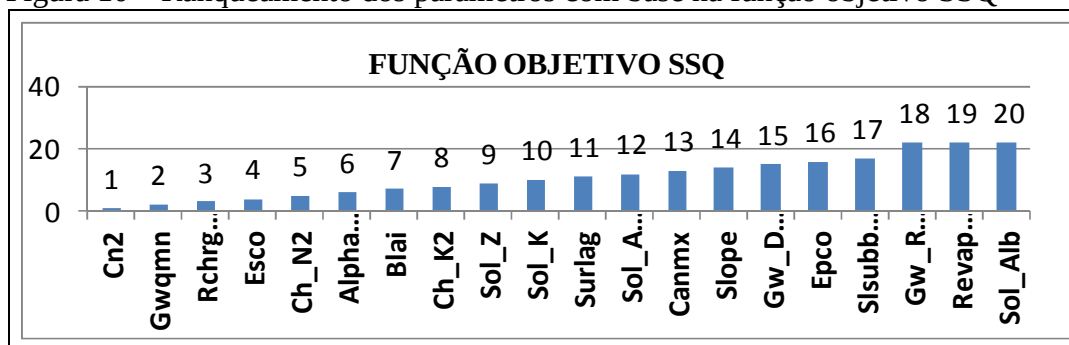
Tabela 6 – Parâmetros que influenciam o processo chuva-vazão disponíveis na análise de sensibilidade do SWAT2005 (conclusão)

Parâmetro, processo	Descrição, limite de existência do parâmetro (unid.)	Faixa de variação, método de alteração	Influência do parâmetro na resposta hidrológica
SOL_Z Perfil do solo	Profundidade da base da camada do solo 0 – 3500 (mm)	-25% a 25% Multiplicação	Aumentá-lo implica aumentar o volume de armazenamento de água no solo
SOL_AWC Perfil do solo	Capacidade de água disponível no solo 0 – 1 (mm H₂O/mm solo)	-25% a 25% Multiplicação	Aumentá-lo implica aumentar o estoque de umidade do solo, diminuir o escoamento superficial e o escoamento de base
BLAI Crescimento de vegetação	Índice do potencial máximo de área foliar 0,5 – 10 (m²/m²)	0 a 1 Substituição	Aumentá-lo implica em maior eficiência no desenvolvimento vegetal e perdas por transpiração e remoção radicular

Fonte: NEITSCH et al., 2004, van GRIENSVEN et al., 2005 e SWAT2005 Geodatabase.

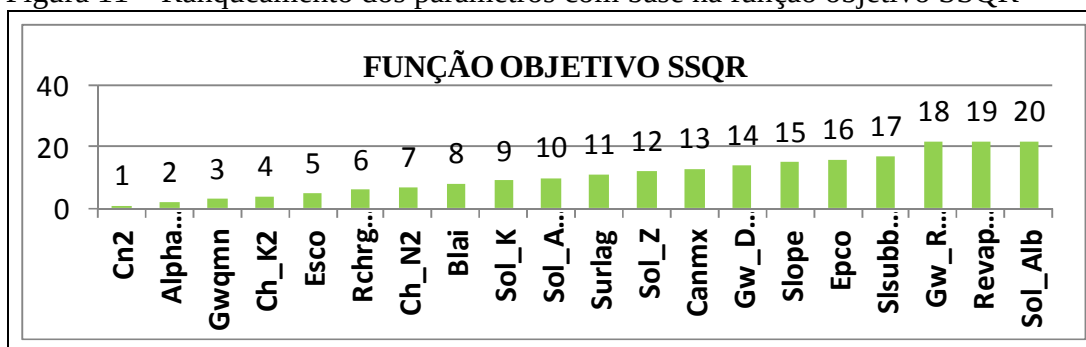
As Figuras 10, 11 e 12 mostram a classificação dos parâmetros considerados na análise de sensibilidade para o processo chuva-vazão. Todos estão identificados na Tabela 6. De acordo com van Griensven (2006) o parâmetro que ganha posição “1” é “muito importante”, as posições “2” a “6”, “importantes”, e as posições “7” a “20”, “pouco importantes”.

Figura 10 – Ranqueamento dos parâmetros com base na função objetivo SSQ



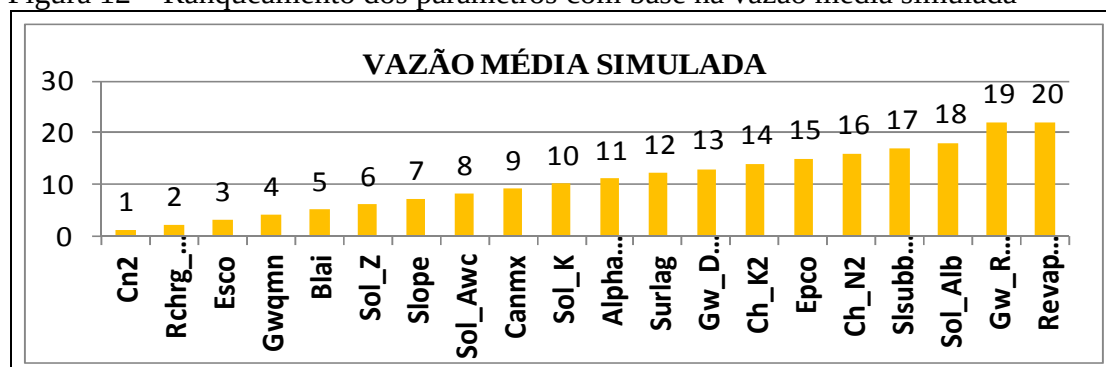
Fonte: O autor, 2014.

Figura 11 – Ranqueamento dos parâmetros com base na função objetivo SSQR



Fonte: O autor, 2014.

Figura 12 – Ranqueamento dos parâmetros com base na vazão média simulada



Fonte: O autor, 2014.

Os resultados da análise de sensibilidade para os três critérios de otimização (SSQ, SSQR e vazão média simulada) confirmaram quatro parâmetros comuns entre os seis mais sensíveis: CN2, ESCO, GWQMN e RCHRG_DP, e um parâmetro, ALPHA_BF, comum às duas funções objetivo. CN2 está relacionado com as características e condições do solo, influencia o escoamento superficial. ESCO influencia a taxa de evaporação da água no solo. GWQMN, RCHRG_DP e ALPHA_BF, parâmetros por natureza de difícil estimativa, influenciam o volume, movimento e tempo de recarga dos aquíferos e o escoamento de base.

Os outros parâmetros que apareceram entre os seis mais sensíveis, mas que não foram comuns aos três critérios (SSQ, SSQR e vazão média simulada), estão relacionados com os canais, cobertura vegetal e solos. CH_N2 influencia a velocidade da água no solo e, conseqüentemente, o tempo de concentração. CH_K2 controla a perda por transmissão no canal. BLAI controla a eficiência do desenvolvimento vegetal. SOL_Z influencia o movimento da água no solo. CH_N2 teve escore “5” com a função SSQ. CH_K2 teve escore “4” com a função SSQR. Com o critério da vazão média simulada CH_N2 teve escore “16” e CH_K2 teve escore “14”. Os parâmetros, BLAI e SOL_Z, tiveram escores “5” e “6”, respectivamente, com o critério de vazões simuladas.

Da análise de sensibilidade, considerando apenas os seis principais parâmetros ranqueados (escores “1” a “6”), o mais importante foi CN2, com escore “1” nos três critérios. Este parâmetro é o principal divisor das águas que entram na bacia, responsável pela resposta do escoamento superficial e volume infiltrado. Dos demais parâmetros analisados, ESCO (com escores “3”, “4” e “5”), é importante para o ajuste das perdas por evaporação do solo. Os parâmetros GWQMN, RCHRG_DP e ALPHA_BF são importantes nos ajustes dos aquíferos e no controle do escoamento de base.

3.3 Autocalibração

Com a finalidade de verificar o desempenho da ferramenta de calibração automática para o ajuste do modelo foram considerados os mesmos parâmetros usados na análise de sensibilidade. Vale destacar que não foram realizadas análises comparativas entre conjuntos diferentes de parâmetros. A execução do algoritmo PARASOL que busca o mínimo da função objetivo SSQ ou SSQR para os ajustes teve a seguinte configuração:

- a) MAXN = 3000 – número de simulações realizadas sobre o conjunto de parâmetros;
- b) PERCENTO = 0,01 (valor padrão) – valor incremental aplicado ao parâmetro;
- c) NGS = 10 (valor padrão) – número de complexos admitidos para a população inicial;
- d) KSTOP = 5 (valor padrão) – número de otimizações da função objetivo;
- e) O arquivo de vazões médias diárias observadas (denominado “floday.dat”) foi criado (em m³/s) para comparar as vazões simuladas e observadas no período de 01/11/2005 a 18/02/2006;
- f) O período de aquecimento de 01/04/2004 a 30/10/2005 foi o mesmo usado na primeira simulação (antes da calibração);
- g) A otimização dos parâmetros foi realizada por meio das funções objetivo SSQ e SSQR.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da autocalibração para as funções objetivo SSQ e SSQR. Em relação à primeira simulação (antes da calibração) os quatro indicadores estatísticos R^2 , NSE, PBIAS e RSR foram melhores para as duas funções objetivo. Na comparação entre as duas funções objetivo os indicadores R^2 , NSE e RSR foram melhores para SSQR, mas em relação a PBIAS a simulação foi superestimada (18,59 contra 10,49), em razão de que a função SSQ privilegia o ajuste pelos picos de vazão e a SSQR considera as magnitudes entre as vazões. Os valores de R^2 e NSE foram determinantes para se qualificar o desempenho pela função SSQR como mais satisfatório. Nos dois casos o balanço hídrico foi semelhante, mas mostrou a necessidade de ajustes para adequar o escoamento de base cuja simulação não registrou vazões, inconsistente com a realidade da microbacia experimental.

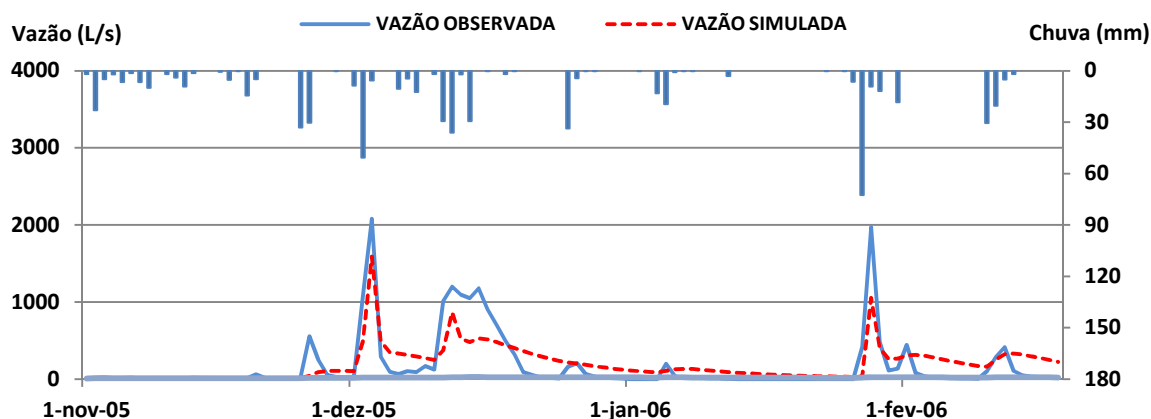
Tabela 7 – Resultados da autocalibração com as funções objetivo SSQ e SSQR

Função objetivo	Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
												R ²	NSE	PBIAS	RSR
Primeira simulação	609,5	625,4	326,9	174,3	212,4	70,6	123,7	350	19,4	1,4	0,0	0,66	0,59	21,82	0,64
SSQ	609,5	625,4	355,4	174,3	192,6	197,1	0,0	0	12,9	0,5	17,1	0,71	0,65	10,49	0,59
SSQR	609,5	625,4	339,2	174,3	206,8	199,1	0,0	0	11,6	4,0	0,0	0,79	0,74	18,59	0,51

Fonte: O autor, 2014.

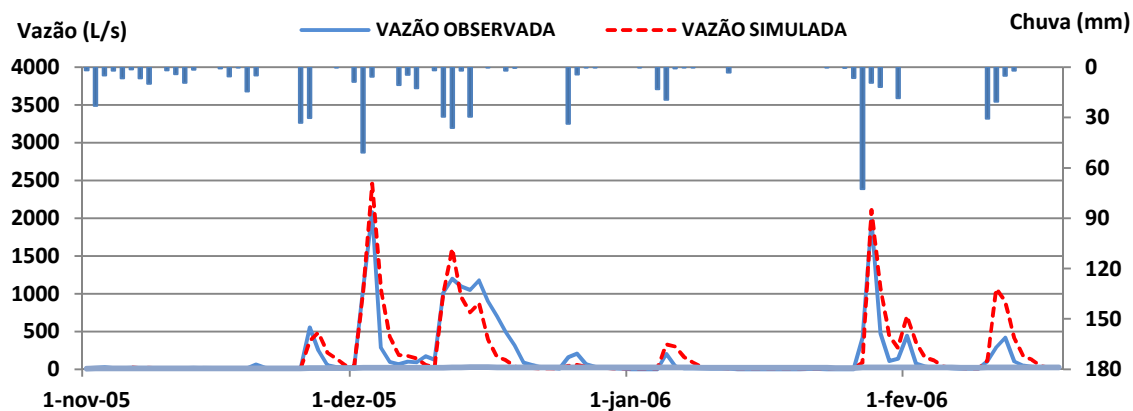
As figuras 13 e 14 mostram os hidrogramas observado/simulado da autocalibração com as funções objetivo SSQ e SSQR. A inspeção visual indicou melhor desempenho com a função SSQR, confirmado também pelos valores de R² e NSE.

Figura 13 – Hidrogramas observado/simulado com a função SSQ (autocalibração)



Fonte: O autor, 2014.

Figura 14 – Hidrogramas observado/simulado com a função SSQR (autocalibração)



Fonte: O autor, 2014.

Apesar do ajuste com a função objetivo SSQR ter representado satisfatoriamente o regime hidrológico, conforme verificado nos hidrogramas e confirmado pelos indicadores estatísticos, duas questões recomendaram a realização de novos ajustes por tentativa e erro. A primeira razão, porque o escoamento de base simulado esteve zerado em todo período, situação inconsistente com a realidade da microbacia experimental e demonstrada pelo monitoramento das vazões que ocorreram em níveis de baixos a mínimos, mesmo quando não houve registros pluviométricos. A outra razão para continuar com a calibração pretendeu melhorar os indicadores de avaliação.

3.4 Calibração manual

Em razão da autocalibração não ter sido suficiente para ajustar as vazões simuladas às observadas optou-se pela realização da calibração manual. A estratégia escolhida baseou-se nas recomendações de Neitsch et al. (2002) para iniciar os ajustes considerando os parâmetros que têm influência direta no balanço hídrico superficial. Neste caso, considerando os resultados da análise de sensibilidade foram escolhidos os parâmetros CN2 e ESCO, que estavam entre os seis mais sensíveis conforme a classificação de van Griensven (2006). Os parâmetros GWQMN, RCHRG_DP e ALPHA_BF relacionados com os aquíferos e o escoamento de base foram deixados para uma etapa posterior, caso fosse necessário continuar com o ajuste. No processo de calibração cada parâmetro teve seu valor alterado até que se atingissem os melhores valores para os indicadores de eficiência (R^2 , NSE, PBIAS e RSR) e avaliado o balanço hídrico, hidrogramas e gráficos de dispersão e resíduos. O melhor desempenho seria usado para validação do modelo.

Na sequência da calibração o parâmetro CN2 foi variado para menos sucessivamente a partir do valor de “CN2 = 84”, que havia sido obtido na autocalibração com a função objetivo SSQR. A diminuição do valor de CN2 teve como finalidade gerar menos escoamento superficial, mais infiltração e simular escoamento de base. A calibração terminou ao ser verificado uma mudança no desempenho em termos dos indicadores R^2 e NSE, culminando com “CN2 = 75”. Na Tabela 8 estão consolidadas as simulações com dados sobre o balanço hídrico, saídas simuladas, vazão média observada e coeficientes estatísticos. Os resultados para “CN2 = 69” foram os da primeira simulação (antes da calibração). Entre os resultados de CN2 os valores dos indicadores estiveram muito próximos para “CN2 = 81” até “CN2 = 77”. O melhor ajuste foi para “CN2 = 80”.

O desempate entre as simulações considerou os melhores coeficientes de R^2 e NSE, justificados pela correlação e aderência entre os dados, com escore “muito bom” de acordo com o critério de Moriasi et al. (2007). O valor de “PBIAS = 29,73” não estava satisfatório e de “RSR = 0,45”, “muito bom”. No entanto, o valor de PBIAS não invalidou a conclusão em termos dos indicadores R^2 , NSE e RSR. Os valor de PBIAS indicou que a simulação foi superestimada, tendo ficado acima de 25% pelo critério de Moriasi et al. (2007). Em termos do balanço hídrico vale destacar que as simulações representaram o escoamento de base de maneira adequada em termos da magnitude média conforme esperado para a microbacia experimental.

Tabela 8 – Resultados da calibração do parâmetro CN2

CN2*	Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
												R^2	NSE	PBIAS	RSR
CN2 69 primeira simulação	609,5	625,4	326,9	174,3	212,4	70,6	123,7	350	19,4	1,4	0,0	0,66	0,59	21,82	0,64
84	609,5	625,4	323,8	174,3	234,5	162,5	56,3	180	17,1	1,5	0,0	0,80	0,75	34,53	0,50
83	609,5	625,4	324,2	174,3	232,1	155,3	60,9	210	17,3	1,5	0,0	0,80	0,76	33,13	0,49
82	609,5	625,4	324,2	174,3	232,1	155,3	60,9	210	17,3	1,5	0,0	0,80	0,76	33,13	0,49
81	609,5	625,4	324,9	174,3	228,1	141,9	70,0	230	17,6	1,5	0,0	0,81	0,79	30,84	0,46
80	609,5	625,4	325,2	174,3	226,2	135,1	74,7	240	17,8	1,5	0,0	0,81	0,80	29,73	0,45
79	609,5	625,4	325,5	174,3	225,0	129,0	79,4	230	18,0	1,4	0,0	0,81	0,79	29,07	0,46
78	609,5	625,4	325,8	174,3	223,7	123,1	83,7	240	18,1	1,4	0,0	0,81	0,79	28,29	0,46
77	609,5	625,4	326,0	174,3	221,6	116,8	87,8	250	18,2	1,4	0,0	0,81	0,78	27,10	0,47
76	609,5	625,4	326,2	174,3	220,1	110,6	92,4	250	18,4	1,4	0,0	0,80	0,77	26,22	0,48
75	609,5	625,4	326,3	174,3	218,9	104,5	97,1	250	18,6	1,4	0,0	0,79	0,76	25,54	0,49

* O valor de “CN2 = 69” correspondeu à parametrização inicial do modelo com os resultados da primeira simulação. Os demais valores de CN2 representaram os testes de calibração. O valor mais alto de “CN2 = 84” foi o ponto de partida, considerando ter sido este o melhor valor obtido para CN2 com a autocalibração usando a função objetivo SSQR.

Fonte: O autor, 2014.

Dando continuidade à calibração o parâmetro ESCO foi variado para menos a partir do valor inicial de “ESCO = 0,7” na primeira simulação (antes da calibração), considerando o modelo ajustado para “CN2 = 80”. Vale destacar que na autocalibração com a função objetivo SSQR o melhor valor foi “ESCO = 0,35”. A diminuição do valor de ESCO teve como finalidade gerar menos escoamento superficial pela perda por evaporação do reservatório do solo para aproximar a média das vazões simuladas à média das vazões observadas. A calibração terminou ao ser verificado valor de “ESCO = 0,1”.

Na Tabela 9 estão consolidadas as simulações em termos do balanço hídrico, saídas simuladas, vazão média observada e coeficientes estatísticos. Os valores dos indicadores R^2 e NSE foram os mesmos para os resultados de “ESCO = 0,4” até “ESCO = 0,1”, indicando escore “muito bom” de acordo com o critério de Moriasi et al. (2007). Em termos de PBIAS e RSR todos os resultados foram “muito bons”. Além dos escores “muito bons” de todos os indicadores estatísticos a vazão média simulada ficou próxima da observada, tendo variado muito pouco entre os valores de ESCO, desde 186,6 L/s com “ESCO = 0,4” a 176,2 L/s com “ESCO = 0,1”. Da mesma maneira, o escoamento de base simulado cujos valores médios variaram desde 39,4 L/s com “ESCO = 0,4” e 30,1 L/s com “ESCO = 0,1”. A escolha do melhor ajuste considerou o escoamento de base médio simulado para “ESCO = 0,4”, porque a magnitude foi mais alta que as demais. Foi uma escolha com base na característica hidrológica da microbacia experimental, considerando que os demais valores de ESCO (0,3 ou 0,2 ou 0,1) foram pouco melhores para o indicador PBIAS.

Tabela 9 – Resultados da calibração do parâmetro ESCO (com “CN2 = 80”)

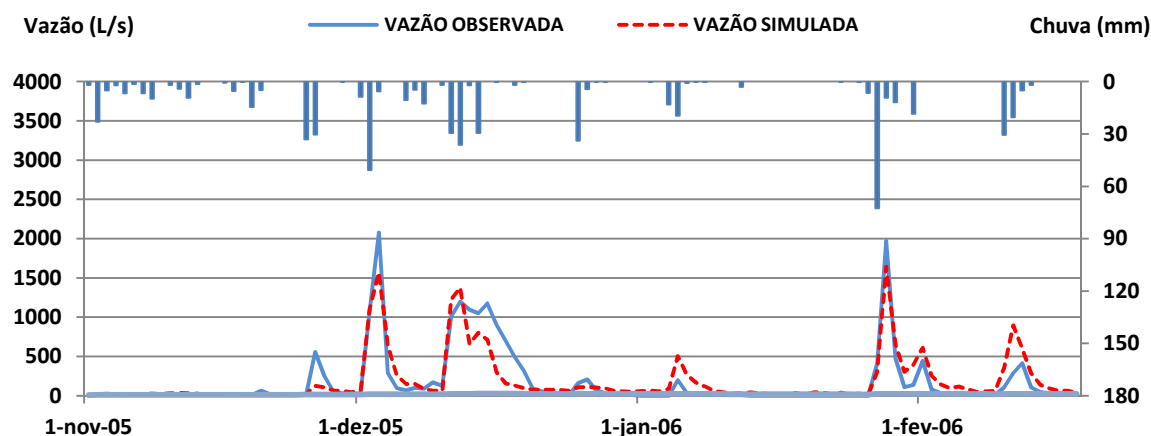
ESCO*	Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
												R^2	NSE	PBIAS	RSR
0,7	609,5	625,4	325,2	174,3	226,2	135,1	74,7	240	17,8	1,5	0,0	0,81	0,80	29,73	0,45
0,6	609,5	625,4	338,4	174,3	207,0	133,3	57,6	180	17,4	1,5	0,0	0,80	0,79	18,71	0,46
0,5	609,5	625,4	347,9	174,3	194,3	132,5	46,1	130	17,1	1,4	0,0	0,80	0,79	11,44	0,46
0,4	609,5	625,4	355,5	174,3	186,6	131,6	39,4	120	16,9	1,4	0,0	0,80	0,80	7,02	0,45
0,3	609,5	625,4	361,2	174,3	181,0	130,9	34,7	120	16,7	1,4	0,0	0,80	0,80	3,81	0,45
0,2	609,5	625,4	365,7	174,3	178,2	130,6	32,5	110	16,5	1,4	0,0	0,80	0,80	2,22	0,45
0,1	609,5	625,4	368,5	174,3	176,2	130,4	30,1	105	16,4	1,4	0,0	0,80	0,80	1,04	0,45

* Os ajustes realizados com o parâmetro ESCO consideraram o modelo ajustado para o parâmetro “CN2 = 80”.

Fonte: O autor, 2014.

As Figuras 15 a 18 mostram os resultados do melhor ajuste para os valores de “CN2 = 80” e “ESCO = 0,4”. A Figura 15 mostra que o regime hidrológico foi representado de maneira adequada, o que pode ser verificado pelos picos de vazão e ramos das curvas sem lapso temporal significativo. A aderência foi confirmada pelo indicador “NSE = 0,80”, considerado “muito bom” pelo critério de Moriasi et al. (2007).

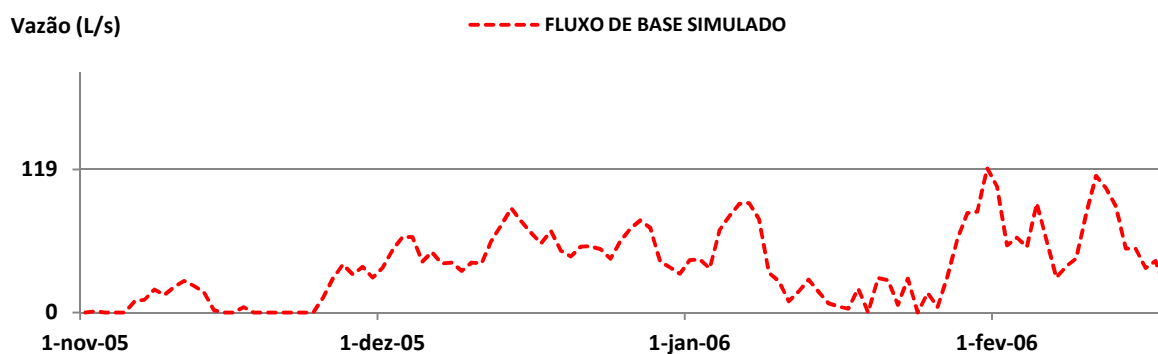
Figura 15 – Hidrogramas observado/simulado (calibração)



Fonte: O autor, 2014.

A Figura 16 mostra o hidrograma do escoamento de base simulado. As médias diárias no período ficaram abaixo de 119 L/s, compatíveis com as vazões observadas nos períodos em que os registros de precipitação foram baixos ou inexistentes.

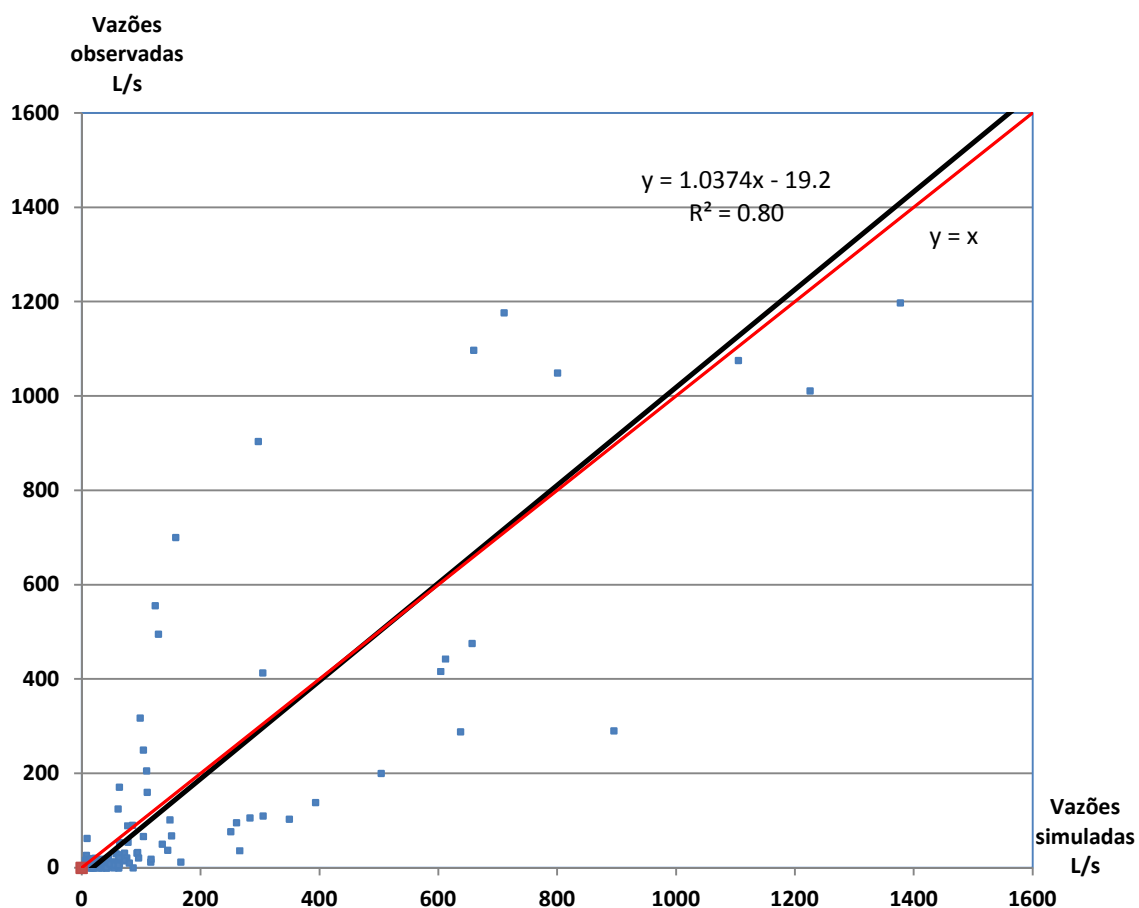
Figura 16 – Hidrograma do escoamento de base simulado (calibração)



Fonte: O autor, 2014.

A Figura 17 mostra a dispersão das vazões diárias simuladas e observadas em relação à reta de ajustamento. A dispersão é menor para as vazões baixas. O coeficiente angular da reta indica uma tendência do modelo superestimar pouco as vazões simuladas, o que foi confirmado pelo indicador “PBIAS = 7,02”.

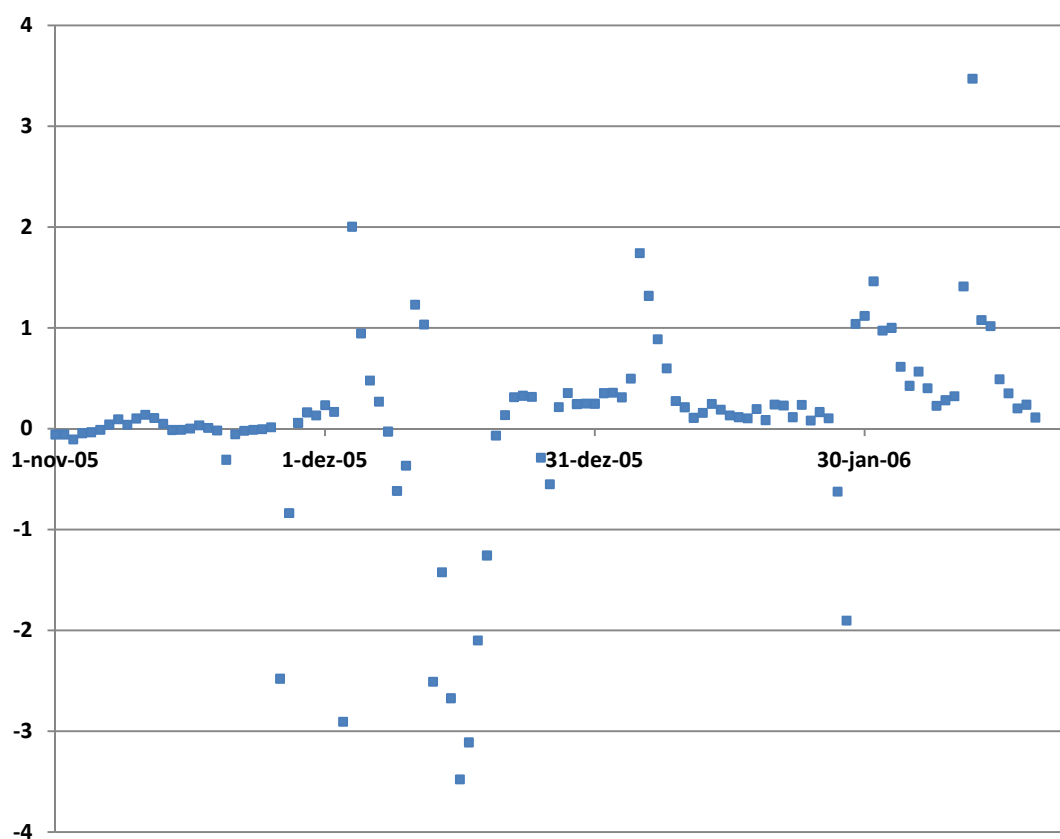
Figura 17 – Dispersão das vazões diárias observadas/simuladas (calibração)



Fonte: O autor, 2014.

A Figura 18 representa os resíduos entre as vazões diárias simuladas e observadas normalizados pela média das vazões diárias observadas. Os resíduos mostraram que as vazões simuladas foram superestimadas. Os resíduos podem ser explicados pela modelagem ter agregado incertezas inerentes aos dados medidos de precipitação e vazão, bem como devido aos valores assumidos para os diversos parâmetros, cuja variabilidade espacial afeta a simulação dos processos em um modelo hidrológico distribuído, além das simplificações adotadas que não levaram em consideração, por exemplo, os usos consuntivos na microbacia experimental.

Figura 18 – Dispersão dos resíduos entre as vazões diárias observadas/simuladas normalizados pela média das vazões diárias observadas (calibração)



Fonte: O autor, 2014.

Depois da calibração dos parâmetros CN2 e ESCO poderia ter sido ainda tentado o ajuste do modelo com os demais parâmetros sensíveis verificados na análise de sensibilidade. No caso, aqueles com influência no escoamento subterrâneo. No entanto, avaliou-se que a continuação das tentativas não teria efeito prático para melhorar significativamente os indicadores estatísticos de eficiência (R^2 , NSE, PBIAS e RSR), que já haviam fornecido uma classificação satisfatória com escore “muito bom” de acordo com o critério de Moriasi et al. (2007). Com base também na análise da dispersão dos resíduos mostrada na Figura 18 alguns aspectos corroboraram esta decisão, como as incertezas relacionadas com a precisão dos dispositivos de monitoramentos e aquisição dos dados e os usos consuntivos não previstos. Depois dessas considerações a última etapa operacional da modelagem foi executada para validação do modelo em outro período de dados com base nos ajustes obtidos para “CN2 = 80” e “ESCO = 0,4.

3.5 Validação

Terminada a etapa de calibração manual foi necessário validar o modelo para o período de 19/02/2006 a 28/08/2006, tendo sido considerado o mesmo período de aquecimento da calibração. No caso da validação o período dos dados observados foi um pouco maior, estendido para os meses junho, julho e agosto/2006 com baixa precipitação, quando ocorre na microbacia experimental demanda maior para irrigação. Ressalta-se que no período de calibração a condição de estiagem não pôde ser verificada com as vazões observadas.

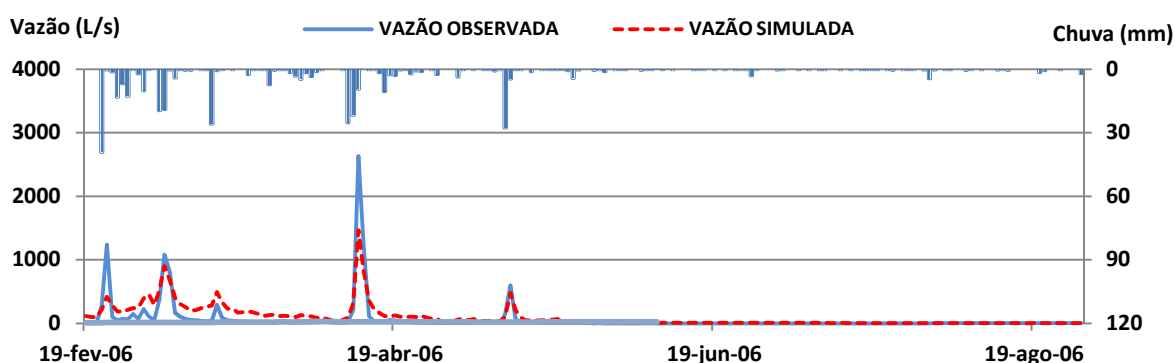
Na Tabela 10 e Figura 19 são apresentados os resultados da simulação no período a ser validado com as condições da parametrização inicial da modelagem (sem ajustes). Os indicadores estatísticos de correlação e aderência (R^2 e NSE) foram considerados “bons” com base no critério de Moriasi et al. (2007). O hidrograma simulado mostrou a capacidade de reproduzir os processos hidrológicos na microbacia experimental. O coeficiente “PBIAS = 59,60” indicou vazões muito superestimadas e de acordo com o critério de Moriasi et al. (2007) o escore foi “não satisfatório”. O indicador “RSR = 0,55” foi considerado “bom”.

Tabela 10 – Resultados da simulação do período a ser validado (antes da validação)

Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
											R ²	NSE	PBIAS	RSR
329,9	609,6	241,7	60,3	96,2	33,3	51,0	240	12,6	0,8	0,0	0,75	0,70	59,60	0,55

Fonte: O autor, 2014.

Figura 19 – Hidrogramas observado/simulado do período a validar (antes da validação)



Fonte: O autor, 2014.

A Tabela 11 e Figuras 20 a 23 apresentam os resultados da validação, considerando os parâmetros “CN2 = 80” e “ESCO = 0,4”. A tabela expressa os valores dos componentes do balanço hídrico e dos indicadores estatísticos. As figuras mostram os hidrogramas observado/simulado, o escoamento de base simulado, os gráficos de dispersão e de resíduos.

Na Tabela 11 os indicadores “ $R^2 = 0,84$ ” e “NSE = 0,80” indicaram boa correlação e aderência entre os dados. De acordo com o critério de Moriasi et al. (2007) o resultado foi considerado “muito bom”. Em termos de “PBIAS = 25,92” e “RSR = 0,44” o escore foi próximo do satisfatório e “muito bom”, respectivamente. Comparado com os resultados da calibração a correlação foi melhor ($R^2 = 0,84$ contra 0,80), a aderência manteve o mesmo valor (NSE = 0,80), aumentou a superestimativa (PBIAS = 7,02 contra 25,02) e o indicador dos desvios o mesmo valor (RSR = 0,44 contra 0,45). A simulação gerou escoamento de base compatível com as vazões observadas quando não houve ocorrência de precipitação na microbacia experimental. Vale destacar que do final de maio/2006 até agosto/2006 muitos foram os registros monitorados com baixíssimas magnitudes ou zerados.

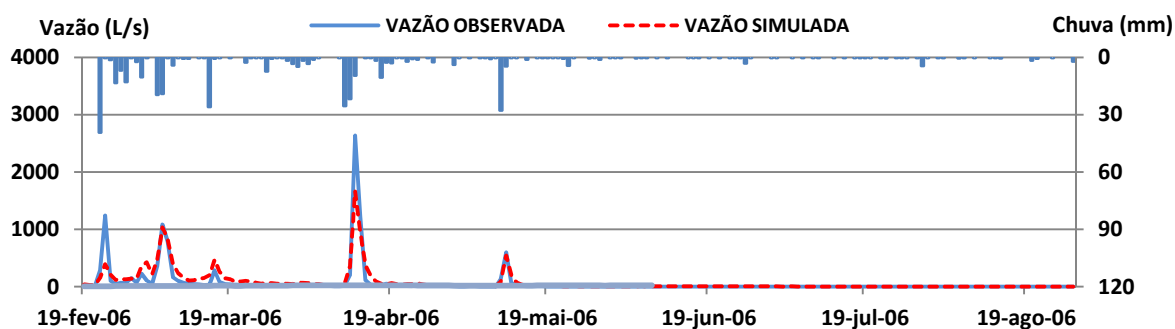
Tabela 11 – Resultados da validação com “CN2 = 80” e “ESCO = 0,4”

Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
											R ²	NSE	PBIAS	RSR
329,9	609,6	253,1	60,3	75,9	44,3	21,9	140	10,5	0,8	0,0	0,84	0,80	25,92	0,44

Fonte: O autor, 2014.

A Figura 20 mostra os hidrogramas observado/simulado com respostas hidrológicas satisfatórias. O comportamento dos picos de vazão foi adequado, assim como dos ramos da curva sem lapso temporal significativo. A aderência foi confirmada pelo indicador “NSE = 0,80”, considerado “muito bom” pelo critério de Moriasi et al. (2007). Há um claro rebatimento com a resposta real da microbacia experimental. De certa maneira é um indicativo de que o modelo acompanhou a tendência nas etapas de ajustes e validação.

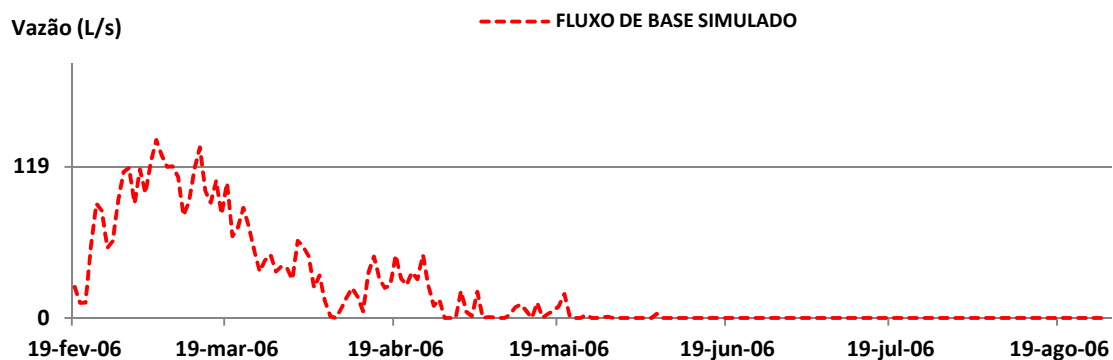
Figura 20 – Hidrogramas observado/simulado (validação)



Fonte: O autor, 2014.

Na Figura 21 o escoamento de base simulado manteve-se na maior parte do período abaixo de 119 L/s, consistente com Moraes (2007) que identificou o escoamento de base como um componente hidrológico importante por manter as vazões da microbacia experimental. No período monitorado as vazões observadas nos períodos com baixa pluviosidade ou nula ficaram abaixo de 119 L/s. Vale destacar que a série de validação, ao contrário da calibração, abrangeu meses com baixíssima pluviosidade. Os meses de junho até agosto/2006 registraram um total de 18,7 mm de precipitação.

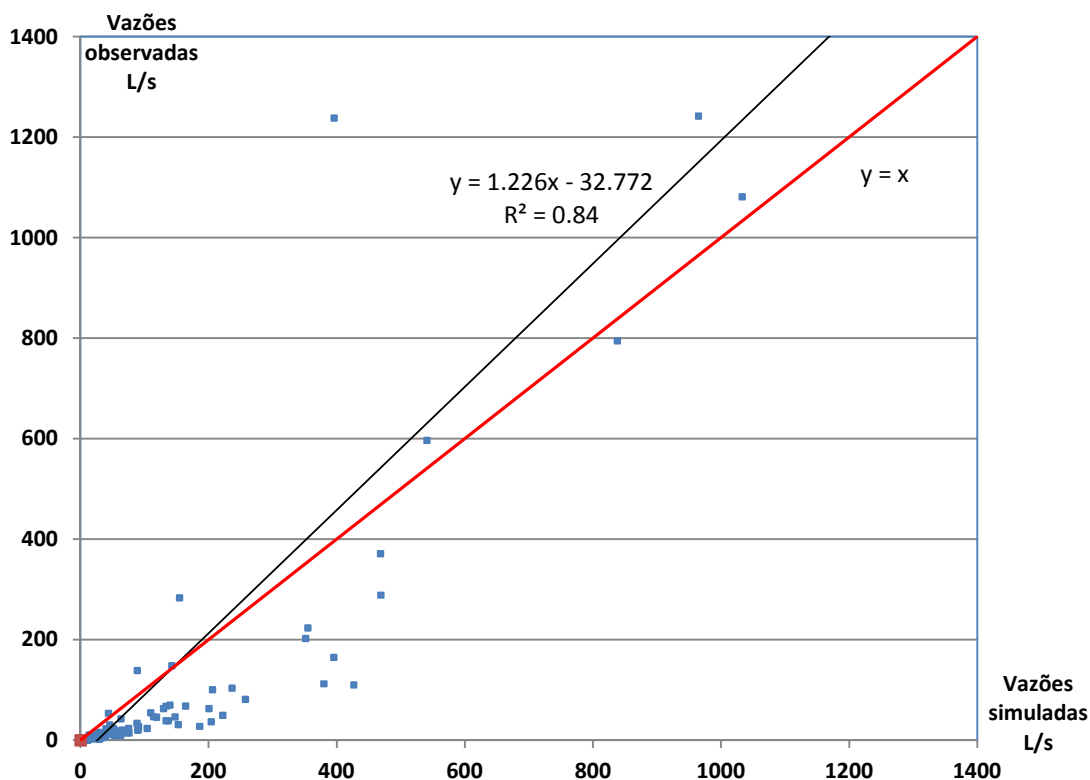
Figura 21 – Hidrograma do escoamento de base simulado (validação)



Fonte: O autor, 2014.

A Figura 22 mostra a dispersão das vazões simuladas e observadas em relação à reta de ajustamento. O coeficiente angular da reta indica uma tendência do modelo superestimar as vazões simuladas, o que foi confirmado pelo indicador “PBIAS = 25,92”. Neste período, a demanda pelo uso da água aumentada para suprir as culturas de inverno pode ter influenciado as vazões observadas cujos registros ficaram subestimados.

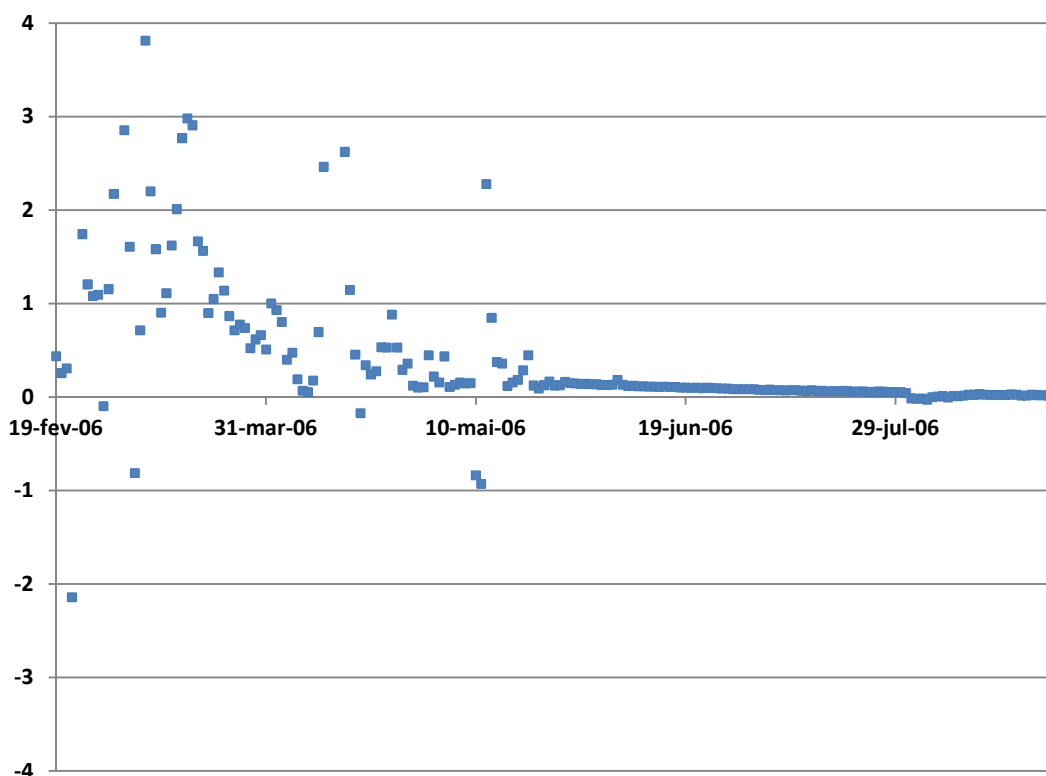
Figura 22 – Dispersão das vazões diárias observadas/simuladas (validação)



Fonte: O autor, 2014.

A Figura 23 representa os resíduos entre as vazões diárias simuladas e observadas normalizados pela média das vazões diárias observadas. Os resíduos mostraram que as vazões simuladas foram superestimadas. Da mesma maneira que na calibração os resíduos podem ser explicados pela modelagem ter agregado incertezas inerentes aos dados medidos de precipitação e vazão, bem como devido aos valores assumidos para os diversos parâmetros, cuja variabilidade espacial afeta a simulação dos processos em um modelo hidrológico distribuído, além das simplificações adotadas que não levaram em consideração, por exemplo, os usos consuntivos na microbacia experimental. Os resíduos próximos de zero a partir de junho/2006 estão associados às vazões observadas próximas de zero e nulas.

Figura 23 – Dispersão dos resíduos entre as vazões diárias observadas/simuladas normalizados pela média das vazões diárias observadas (validação)



Fonte: O autor, 2014.

3.6 Análise dos resultados

A Tabela 12 apresenta a consolidação dos resultados da primeira simulação, autocalibração, calibração manual e validação. Os ajustes dos parâmetros CN2 e ESCO na calibração manual determinaram escore “muito bom” para os coeficientes NSE, PBIAS e RSR com base no critério de Moriasi et al. (2007), e boa correlação em R^2 . No caso da validação o escore foi “muito bom” para NSE e RSR e no limite do satisfatório para PBIAS. A superestimativa das vazões simuladas pode estar associada aos volumes represados para fins de irrigação nos meses de maio até agosto que o monitoramento não registrou. As etapas de ajustes permitiram melhor repartimento da água para o escoamento superficial, infiltração e escoamento de base. Com relação ao fluxo lateral no solo, não foi tentado ajuste para diminuir sua magnitude, em razão da falta de conhecimento sobre o comportamento deste componente na microbacia experimental.

Tabela 12 – Resultados das etapas de calibração e validação

CALIBRAÇÃO															
Etapas	Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
												R ²	NSE	PBIAS	RSR
1ª Simul. sem ajustes	609,5	625,4	326,9	174,3	212,4	70,6	123,7	350	19,4	1,4	0,0	0,66	0,59	21,82	0,64
Autocalib. SSQ	609,5	625,4	355,4	174,3	192,6	197,1	0.0	0	12,9	0,5	17,1	0,71	0,65	10,49	0,59
Autocalib. SSQR	609,5	625,4	339,2	174,3	206,8	199,1	0.0	0	11,6	4,0	0,0	0,79	0,74	18,59	0,51
CN2=80	609,5	625,4	325,2	174,3	226,2	135,1	74,7	240	17,8	1,5	0,0	0,81	0,80	29,73	0,45
CN2=80 ESCO=0,4	609,5	625,4	355,5	174,3	186,6	131,6	39,4	120	16,9	1,4	0,0	0,80	0,80	7,02	0,45
VALIDAÇÃO															
Etapas	Precip. total (mm)	Evap. pot. total (mm)	Evap. real total (mm)	Vazão média observ. (L/s)	Vazão média simul. (L/s)	Escoam. superf. médio simul. (L/s)	Fluxo base médio simul. (L/s)	Valor máximo fluxo base (L/s)	Fluxo lateral médio simul. (L/s)	Evap canal média simul. (L/s)	Perda canal médio simul. (L/s)	Indicadores estatísticos de avaliação da vazão média diária simulada			
												R ²	NSE	PBIAS	RSR
Sem ajustes	329,9	609,6	241,7	60,3	96,2	33,3	51,0	240	12,6	0,8	0,0	0,75	0,70	59,60	0,55
CN2=80 ESCO=0,4	329,9	609,6	253,1	60,3	75,9	44,3	21,9	140	10,5	0,8	0,0	0,84	0,80	25,92	0,44

Fonte: O autor, 2014.

Com a finalidade de contextualizar os resultados obtidos foram comparadas as aplicações brasileiras constantes da Tabela 4, referentes à revisão de Garbosa et al. (2007) no período de 2003-2010, que indicaram uma concentração maior de avaliações para calibrações do que validações para observações mensal e anual. Os valores de NSE estão entre 0,70 e 0,88. No presente estudo com observações diárias o valor de NSE ficou em 0,80 nos períodos de calibração e validação, considerado “muito bom” com base no critério de Moriasi et al. (2007). Com relação a R^2 os poucos exemplos relatados foram da ordem de 0,90. Neste estudo os valores de R^2 foram 0,80 e 0,84 para calibração e validação, respectivamente, bem acima do critério considerado por Santhi et al. (2001), que consideram satisfatórias correlações com índice maior do que 0,60.

Das pesquisas relacionadas na Tabela 4 teve mais sentido comparar o presente estudo com bacias de áreas menores do que 20 km²: (i) Paiva e Paiva (2006), (ii) Lopes e Kobayama (2008), (iii) Marchioro (2008), (iv) Uzeika (2009), e (iv) Bonumá et al. (2010). Em todos prevaleceram avaliações relativas às observações mensais. Em Marchioro (2008), nesta mesma microbacia experimental, o valor calculado de NSE correspondeu a 0,72. Os melhores resultados foram verificados em Paiva e Paiva (2006) com “NSE = 0,88” e “ $R^2 = 0,88$ ”, e em Bonumá et al. (2010) com “NSE = 0,87” e “ $R^2 = 0,90$ ”.

Com base em 64 trabalhos Arnold et al. (2012) reuniram os parâmetros mais usados na calibração do SWAT, categorizando-os nos processos que são simulados, como escoamento superficial, escoamento de base e outros. Com relação ao escoamento superficial os parâmetros mais usados foram: CN2, SOL_AWC, ESCO, EPCO, SURLAG e OV_N. Com relação ao escoamento de base os parâmetros mais usados foram: GW_ALPHA, GW_REVAP, GWQWN, REVAPMN e RCHG_DP. Nesta dissertação o ajuste manual foi realizado com os parâmetros CN2 e ESCO. Além disso, conforme visto na análise de sensibilidade os outros parâmetros que poderiam ter sido considerados: GWQMN, RCHRG_DP e ALPHA-BF também confirmaram as referências da literatura.

Como exemplo de aplicação dos indicadores R^2 , NSE e PBIAS, destaca-se a pesquisa realizada por Andrade (2011) para compará-la com a presente dissertação. A Tabela 13 faz este registro entre as duas áreas. No caso dos indicadores da calibração R^2 praticamente empatou (0,80 contra 0,81), NSE foi melhor (0,80 contra 0,66) e PBIAS pouco abaixo (7,02 contra 4,33). Na validação R^2 ficou abaixo (0,84 contra 0,94), NSE ficou abaixo (0,80 contra 0,87) e PBIAS ficou abaixo (25,92 contra -1,59). Da comparação entre as duas pesquisas o desempenho do SWAT nas duas bacias foi satisfatório na calibração e validação.

Tabela 13 – Comparação com o estudo de Andrade (2011)

Simulação diária	Local	Aquecimento Calibração Validação	Calibração			Validação		
			R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
Andrade (2011)	Sul de MG 32 km ²	- 8 meses - 2 anos - 1 ano	0,81	0,66	4,33	0,94	0,87	-1,59
Presente estudo (2014)	NO do RJ 13,5 km ²	- 18 meses - 3,5 meses - 5,5 meses	0,80	0,80	7,02	0,84	0,80	25,92

Fonte: O autor, 2014.

Moriasi et al. (2007) salientam a importância de serem conhecidas as incertezas relacionadas com os dados medidos ao se considerar o indicador PBIAS para avaliar os modelos hidrológicos. Os ajustes para melhorar o valor de PBIAS podem ser tentados se as incertezas são muito baixas ou muito altas. Na modelagem uma série de situações que interferem nos resultados das simulações pode ocorrer, desde o tamanho e características físicas naturais e antrópicas das bacias hidrográficas, amplitude das séries monitoradas, intervalo das observações (diário, mensal, anual) e qualidade das observações. Se existe conflito entre os escores dos indicadores NSE, PBIAS e RSR usados conjuntamente na avaliação de um modelo os autores sugerem que sejam devidamente interpretados.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O modelo hidrológico SWAT2005 foi aplicado à microbacia experimental e representativa de Santa Maria e Cambiocó para simular o processo chuva-vazão. O estudo pretendeu por meio de calibração e validação avaliar a capacidade do modelo representar o regime hidrológico com base nas vazões médias diárias observadas no período de 2005/2006. Foram utilizadas as ferramentas automáticas de análise de sensibilidade e de calibração, e a calibração manual. Os resultados em cada etapa foram analisados com base nos hidrogramas, balanço hídrico e indicadores estatísticos de eficiência (R^2 , NSE, PBIAS e RSR). A parametrização do modelo envolveu informações relacionadas com o MDE, cobertura do solo, tipos de solos, aquíferos, dados monitorados de chuva e vazão e de variáveis climáticas.

A análise de sensibilidade foi aplicada para o conjunto de todos os parâmetros relacionados com a resposta chuva-vazão que a ferramenta disponibiliza e forneceu uma visão geral da importância de cada um com base no ranqueamento calculado a partir da otimização por funções objetivo e vazão média simulada. Os parâmetros considerados mais significativos depois da análise foram CN2, ESCO, GWQMN, RCHRG_DP e ALPHA_BF, que poderiam ser considerados numa estratégia de calibração manual caso a autocalibração não fosse suficiente para obter o melhor ajuste. Com relação à autocalibração o mesmo conjunto de parâmetros da análise de sensibilidade foi usado. No entanto, a melhor simulação com a função objetivo SSQR não foi suficiente para considerar o modelo ajustado, uma vez que os indicadores estatísticos não caracterizavam a melhor correlação e aderência. Além disso, o modelo não simulou o escoamento de base, característica importante da microbacia experimental. Vale destacar que ambas as ferramentas foram testadas considerando apenas o conjunto de parâmetros relacionados com o processo chuva-vazão.

Não tendo sido satisfatória a calibração automática adotou-se o procedimento manual por tentativa e erro. Os parâmetros CN2 e ESCO foram escolhidos para o ajuste do modelo a partir da análise de sensibilidade. Foram realizados testes sucessivos com a substituição de valores até que se atingisse a melhor correlação e aderência com base na inspeção dos hidrogramas e dos indicadores estatísticos. A solução final foi atendida para “CN2 = 80” e “ESCO = 0,4”. A calibração não prosseguiu em razão de que o maior refinamento seria difícil de ser obtido pela existência de algumas incertezas inerentes aos dados, parametrização e simplificações. A validação posterior para período distinto do usado na calibração considerou os valores destes dois parâmetros ajustados e de todos os demais.

Os resultados da calibração em termos dos coeficientes de correlação e aderência confirmaram que a simulação foi satisfatória. O valor de " $R^2 = 0,80$ " indicou correlação forte e " $NSE = 0,80$ " aderência entre os hidrogramas simulado e observado. Com relação aos indicadores " $PBIAS = 7,02$ " e " $RSR = 0,45$ " houve tendência em superestimar um pouco as vazões simuladas e de resíduos mais acentuados entre as vazões baixas, que prevaleceram no período. De acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007) o resultado foi "muito bom" para os indicadores NSE, PBIAS e RSR.

Os resultados da validação em termos dos coeficientes de correlação e aderência confirmaram que a simulação foi satisfatória. O valor de " $R^2 = 0,84$ " indicou correlação forte e " $NSE = 0,80$ " aderência entre os hidrogramas observado e simulado. De acordo com Moriasi et al. (2007) o resultado foi "muito bom". Com relação aos indicadores " $PBIAS = 25,92$ " e " $RSR = 0,44$ " o resultado ficou no limite do satisfatório e "muito bom", respectivamente. O valor de PBIAS apontou tendência em superestimar as vazões simuladas e o de RSR a existência de resíduos associados principalmente com as vazões baixas, que prevaleceram no período.

No processo de calibração os parâmetros físico-hídricos dos solos não foram ajustados a não ser pelo parâmetro empírico CN2 relacionado com as condições do solo cujo valor final mostrou tendência de menor permeabilidade, refletindo as características da área, suas declividades, a predominância de pastagens e capoeiras, e o uso do solo não preservacionista. O ajuste do parâmetro ESCO diminuiu o escoamento de base para níveis compatíveis com a realidade hidrológica da microbacia experimental. Os parâmetros relacionados com o fluxo subterrâneo não precisaram ser ajustados, mas requerem maior conhecimento para descrever no tempo e espacialmente o comportamento dos aquíferos.

A série de vazões observadas sem falhas e interrupções abrangeu um curto período de tempo de 01/11/2005 a 28/08/2006, e limitada quanto a considerar dados sistemáticos de períodos mais secos, chuvosos e medianos, bem como informações sobre eventos de cheias. Os dados das variáveis climáticas do gerador de clima do modelo foram calculados com base em série histórica de 20 anos representativa da área estudada. A evapotranspiração potencial não foi fornecida, mas calculada pelo método de Hargreaves, que foi escolhido por considerar apenas a variável temperatura e introduzir menos incertezas aos resultados. O escoamento superficial foi gerado como excesso da infiltração pela simulação com base nos dados subdiários de precipitação. Não houve necessidade de tratamento dos dados medidos de chuva e vazão, uma vez que já haviam sido consistidos por Moraes (2007).

A complexidade do SWAT está relacionada com sua base de dados sobre diversas características físicas, meteorológicas e antrópicas da bacia hidrográfica. As incertezas costumam estar associadas aos dados de entrada e à estimativa dos parâmetros. Dessa maneira, os aspectos multidisciplinares dos dados recomenda que o modelador busque na experiência de outros profissionais ajuda para garantir a consistência das informações. A pesquisa preliminar e aquisição dos dados é uma tarefa primordial para que se obtenham resultados confiáveis. Não se deve deixar toda a compreensão dos processos hidrológicos para a calibração, uma vez que esta etapa deve ser a menos penosa da modelagem, se estiverem garantidas desde o início a representatividade dos dados. Este cuidado não se refere apenas ao uso dos componentes hidrológicos de vazão, mas também para os aspectos associados às práticas de manejo do solo, usos e qualidade da água, além de características específicas que certas bacias precisam representar como a existência de corpos hídricos.

Os dados usados na modelagem chuva-vazão com o SWAT são fundamentais para o êxito das demais aplicações na bacia hidrográfica. A calibração e validação deste componente é o primeiro passo para garantir o uso do modelo em toda sua abrangência, que considera os impactos sobre a produção de sedimentos e qualidade da água – envolvendo também ajustes específicos sobre os parâmetros associados com estes elementos. No caso da presente dissertação algumas questões devem ser destacadas e podem servir como recomendações para outros trabalhos. São elas:

- a) Como em outras aplicações de simulação hidrológica recomenda-se que a extensão temporal das séries de chuva e vazão compreendam estações secas, chuvosas, medianas e variações sazonais, assim como dispor de medições das vazões de estiagem e cheias a fim de assegurar a representatividade do ciclo hidrológico;
- b) A série histórica usada pelo gerador de clima deve ser de longo termo e representativa a fim de que garanta a variabilidade temporal dos dados, considerando a importância do gerador para reproduzir as condições climáticas para os processos hidrológicos simulados;
- c) As características relevantes da bacia, dos reservatórios subterrâneos e das variáveis/parâmetros que podem interferir nos resultados da aplicação devem ser bem conhecidos a fim de que generalizações e simplificações não afetem significativamente a simulação dos processos hidrológicos e o balanço de massa entre os reservatórios;

- d) O MDE em termos de resolução deve assegurar que a topografia possa replicar a bacia com nível de detalhe capaz de capturar a variabilidade espacial dos parâmetros e simular convenientemente os processos hidrológicos na escala desejada da aplicação.

Destacam-se a seguir as principais contribuições desta pesquisa:

- a) A expertise no uso do SWAT no âmbito do GRHIP/UERJ com possibilidade de novos estudos sobre modelagem hidrológica na região Noroeste Fluminense;
- b) A consolidação de uma base mínima de dados de chuva, vazão, solos e clima para o SWAT na microbacia experimental, que pode ser aperfeiçoada e usada em outras aplicações;
- c) A utilização dos dados monitorados de chuva e vazão de Moraes (2007) e a confirmação de sua qualidade com os resultados gerados pelo SWAT;
- d) A simulação com dados subdiários de precipitação e cálculo do escoamento superficial pelo excesso da infiltração, uma vez que a maioria das aplicações do SWAT considera o método Curva Número;
- e) A validação do componente hidrológico de vazão do SWAT, fundamental para justificar seu uso em aplicações que considerem a erosão e transporte de contaminantes em bacias.

Entre as sugestões para aplicações futuras do SWAT na microbacia experimental poderão ser abordadas as seguintes questões:

- a) Simulação de períodos críticos de oferta hídrica, constituindo cenários para o planejamento de recursos hídricos;
- b) Avaliação do impacto dos usos consuntivos relacionados com as culturas nos meses secos;
- c) Produção e transporte de sedimentos relacionados aos processos erosivos reais e/ou potenciais em cenários alternativos de uso do solo;
- d) Avaliações comparativas relacionadas com certas características do modelo, como resolução do MDE, detalhe para definição da drenagem e discretização de URHs;
- e) Definição de cenários de ocupação e uso do solo que considerem a realidade socioeconômica e a recuperação ambiental de áreas degradadas.

Vale destacar outra sugestão de importante aplicação nesta microbacia experimental relacionada à existência de dados subdiários de precipitação, uma vez que a simulação pelo SWAT permite o cálculo da variação de umidade que ocorre em cada camada do solo, característica relevante para gestão das atividades agrícolas que dependem de avaliações mais específicas sobre as flutuações hídricas no perfil do solo. As bacias hidrográficas em que os usos consuntivos estão associados à irrigação podem ser monitoradas, e com base em previsões relacionadas à oferta/demanda de água ser realizado planejamento da produção agrícola, antecipando medidas corretivas.

Com relação a outras microbacias no município de São José de Ubá e da região Noroeste Fluminense o SWAT pode ser aplicado ainda que em áreas não instrumentadas e remotas. Atualmente, séries diárias de precipitação, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, baseadas em modelos atmosféricos de alta resolução, estão disponíveis no período de 1979-2010, no *Global Weather Data for SWAT*, permitindo que estudos de cenários, entre outros, possam ser desenvolvidos. Além disso, os dados relacionados com o uso e ocupação do solo podem ser adquiridos indiretamente pelo processamento de imagens de satélites e complementados por levantamentos expeditos de curta duração e baixo custo.

Com relação à previsão de vazões pelo SWAT que garantam a confiabilidade do uso de instrumentos de gestão, nesta microbacia experimental e em qualquer outra, uma série de condições são necessárias, sempre dependentes do conhecimento dos parâmetros físicos da bacia hidrográfica que influenciam as respostas chuva-vazão, a disponibilidade de séries monitoradas de chuva e vazão que definam ajustes corretos sobre estes parâmetros, e o uso do solo que envolve consumo de água e operações de manejo agrícola.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). *GEO Brasil Recursos Hídricos*. Componente da Série de Relatórios sobre o Estado e Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil. Brasília, 2007. 59 p. Resumo Executivo. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalog/2010/GEOBrasilResumoExecutivo_Portugues.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2012.
- ARNOLD, J.G. et al. SWAT: model use, calibration and validation. *Trans. ASABE*, v. 55(4), p. 1491-1508, 2012. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/70993/azdez.asp.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2013.
- BASE FLOW FILTER PROGRAM. Estimates baseflow and groundwater recharge from streamflow records using the methodology outlined in *Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records* by J.G. Arnold and P.M. Allen published in Journal of the American Water Resources Association, vol 35(2), (April 1999): 411-424 and *Automated base flow separation and recession analysis techniques* by J.G. Arnold, P.M. Allen, R. Muttiah, and G. Bernhardt published in Ground Water, vol 33(6): 1010-1018. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/software/baseflow-filter-program/>>. Acesso em: 09 jul. 2012.
- BHERING, S.B. et al. Caracterização edafoambiental das microbacias de Cambiocó e Santa Maria, no município de São José de Ubá, região noroeste do estado do Rio de Janeiro, para fins de planejamento conservacionista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., Recife, 2005.
- BLAINSKI, E. & GARBOSSA, L.H.P. Estimativa do regime hidrológico em uma bacia hidrográfica com base na modelagem hidrológica e distribuída. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 2009. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/8096ab5dd24f2d04328da4862df8f3a4_0c97e615ab3478c77e4850ce65268013.pdf>. Acesso em: 20 set. 2013.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. *Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CUNDERLIK, J.M. *Hydrologic model selection fort the CFCAS project*: assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions. Project Report I. Canada: University of Western Ontario, 2003. Disponível em: <<http://www.eng.uwo.ca/research/iclr/fids/publications/cfcas-climate/reports/Report%20I.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2012.
- DANIEL, E.B. et al. Watershed modeling and its applications: state-of-the-art review. *The Open Hydrology Journal*, 2011. Disponível em: <<http://www.benthamscience.com/open/tohyd/articles/V005/26TOHYDJ.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012.

GARBOSSA, L.H.P. et al. The use and results of the soil and water assessment tool in Brazil: a review from 1999 until 2010. In: 2011 INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE & WORKSHOPS, Toledo, Spain, 2011. Disponível em: <http://intranetdoc.epagri.sc.gov.br/producao_tecnico_cientifica/DOC_3761.pdf>. Acesso em: 05 out. 2013.

GASSMAN, P.W. et al. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007. Disponível em: <http://www.card.iastate.edu/environment/items/asabe_swat.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2012.

GASSMAN, P.W.; SADEGHI, A.M; SRINIVASAN, R. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *Journal of Environmental Quality*. 2014. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/pdfs/43/1/1>>. Acesso em: 02 fev. 2014.

GEPARMBH, 2003. *Relatório 1 do Projeto Gestão Participativa da Bacia do Rio São Domingos*. In: Edital CT-HIDRO/FINEP-MCT 02/2002.

GOMES, M.A. et al. Tecnologias apropriadas à revitalização da capacidade de produção de água de mananciais. In: ASSEMBLÉIA DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS SERVIÇOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO, 33., Santo André, 2003. Disponível em: <http://www.semasa.sp.gov.br/documentos/asemae/trab_04.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2012.

GONÇALVES, A.O; FIDALGO, E.C.C.; BASTOS, C.L. Caracterização climática do município de São José de Ubá, estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 95, 2006. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/bpd95_2006_clima_sao_jose_uba.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2012.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia (Brasil). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Série histórica climatológica: 1990-2010. Estação Itaperuna-RJ. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep/bdmep/bdmep>>. Acesso em: 27 mar. 2013.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia (Brasil). Série histórica climatológica: 2005-2008. Estação Itaperuna-RJ. Cedido pelo INMET. 2008.

JAJARMIZADEH, M.J.; HARUN, S.; SALARPOUR, M. A. Review on theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*, Iowa City, v. 5, n. 5, p. 249-261, 2012. Disponível em: <<http://scialert.net/qredirect.php?doi=jest.2012.2012.249.261&linkid=pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

KOBYIAMA, M. et al. Papel das comunidades e da universidade no gerenciamento de desastres naturais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://www.cfh.ufsc.br/~gedn/sibraden/cd/EIXO%205_OK/5-65.pdf>. Acesso em: 18 set. 2013.

KRAUSE, P.; BOYLE, D.P.; BÄSE, F. Comparison of different criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, v. 5, p. 89-97, 2005. Disponível em: <<http://www.adv-geosci.net/5/89/2005/adgeo-5-89-2005.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2013.

KRYSANOVA, V.; ARNOLD, J.G. Advances in ecohydrological modelling with SWAT – a review. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, v. 53, n. 5, 2008.

LEGATES, D.R.; McCabe Jr., G.J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resource Research*, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999. Disponível em: <ftp://ftp.biosfera.dea.ufv.br/users/francisca/Franciz/papers/Legates%20&%20McCabe%20Jr%20WRR%201999.pdf>. Acesso em: 18 set. 2013.

LIMA, L.A. et al. Favorabilidade de aquíferos fraturados na bacia hidrográfica do rio São Domingos-RJ. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 32, n. 2, Rio de Janeiro, 2009.

LUMBRERAS, J.F. et al. Solos da bacia hidrográfica do rio São Domingos, RJ. In: WORKSHOP DE INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES OBTIDAS NO ÂMBITO DO PROJETO PRODETAB AQUÍFEROS, Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

MARTIN, P.H. et al. Interfacing GIS with water resource models: a state-of-the-art review. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 41, n.6, p. 1471-1487, 2005. Disponível em: http://cnrfiles.uwsp.edu/turyk/Database/Development/MJB/private/Thesis/JournalArticles/Martin_2005.pdf. Acesso em: 16 jun. 2012.

MARTORANO, L.G. et al. *Aspectos climáticos do noroeste fluminense, RJ*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. Disponível em: http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/doc_43_2003_noroeste_fluminense.pdf. Acesso em: 12 mai. 2013.

MOORE, I.D. et al. *GIS and land-surface-subsurface process modeling*. In: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T. *Environmental modeling with GIS*. New York: Oxford University Press, 1993.

MORAES, M.F. *Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental e representativa de Santa Maria e Cambiocó, município de São José de Ubá-RJ*. 2007. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

MORAES, M.F. et al. Estudo de balanço hídrico na bacia experimental de Santa Maria e Cambiocó. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., São Paulo, 2010.

MORIASI, D.N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>. Acesso em: 02 set. 2013.

NEITSCH, S.L. et al. *SWAT Theoretical Documentation, Version 2000*. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Texas Water Resources Institute, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, 2002. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/documentation/>. Acesso em: 25 abr. 2012.

NEITSCH, S.L. et al. *SWAT Input/Output File Documentation, Version 2005*. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Texas Water Resources Institute, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, 2004. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/documentation/>. Acesso em: 05 mai. 2012.

NEITSCH, S.L. et al. *SWAT Theoretical Documentation, Version 2005*. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Texas Water Resources Institute, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, 2005. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/documentation/>>. Acesso em: 05 mai. 2012.

NORONHA, G.C.; PIMENTEL DA SILVA, L.; HORA M.G.A.M. Avaliação dos usos consuntivos na microbacia de Santa Maria e Cambiocó, São José de Ubá, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., Porto Alegre, 2013.

OLIVEIRA, M.B. de, *Análise do desempenho de equações de infiltração e de métodos de determinação da capacidade de campo dos solos em uma bacia hidrográfica de São José de Ubá-RJ*. 2005. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

OTTONI, M. *Classificação físico-hídrica de solos e determinação da capacidade de campo in situ a partir de testes de infiltração*. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

PIMENTEL DA SILVA, L.; EWEN, J. Modelagem hidrológica para grandes bacias hidrográficas: a necessidade de novas metodologias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 4, p. 81-92, 2000.

PROGRAM DEW02.EXE. Calculate the average daily dewpoint temperature per month using daily air temperature and humidity data. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/software/links-to-related-software/>>. Acesso em: 09 jul. 2013.

REFSGAARD J.C. et al. Uncertainty in the environmental modeling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, p. 1543-1556, 2007. Disponível em: <<http://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/27087/NWS-E-2007-102.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 set. 2013.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. *Modelos hidrológicos para gestão ambiental*. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. MCT/INPE. Relatório Técnico Parcial. São José dos Campos: INPE, 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 10 set. 2013.

RESTREPO, P.; SCHAAKE, J. *Hydrologic forecasting in the 21st century: Challenges and directions of research*. Vienna, Austria: EGU General Assembly, p. 19-24, 2009.

SANTHI, C. et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001. Disponível em: <<http://ssl.tamu.edu/media/11881/validation%20of%20the%20swat%20model%20on%20a%20large%20river%20basin%20with%20point%20and%20nps.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2013.

SARMENTO, L. *Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho do modelo de simulação de bacias hidrográficas*. 2010. 241 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SUI D.Z.; MAGGIO R.C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 23, p. 33-51, 1999. Disponível em: <<http://www.training.fema.gov/emiweb/edu/docs/hrm/session%206%20-%20reading-integrating%20gis.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

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

TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRS/ABRH, 2004.

van GRIENSVEN, A. Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005. 2005. Disponível em: <http://biomath.ugent.be/~ann/swat_manuals/SWAT2005_manual_sens_cal_unc.pdf>. Acesso em: 05 set. 2013.

van GRIENSVEN, A. Global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v. ¼, p. 10-23, 2006. Disponível em: <http://soils.ifas.ufl.edu/faculty/grunwald/home/PDFs/Hydrology_globsens_2006.pdf>. Acesso em: 02 set. 2013.

VAN LIEW, M.W.; VEITH, T.L. Guidelines for using sensitivity analysis and auto-calibration tools for multi-gage or multi-step calibration in SWAT, 2010. Disponível em: <<http://www.heartlandwq.iastate.edu/NR/rdonlyres/E1A747FB-4B95-485C-97C4-A055CD4DBEF2/136892/GuidelinesforSENSITIVITYANDAUTOCALIBRATIONINSWAT.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2013.

VELEDA, J.A.D. *Gestão Sustentável de Bacias Hidrográficas: base conceitual e proposições para a recuperação ambiental do município de São José de Ubá, RJ*. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

WGN EXCEL MACRO. Calculate the weather station statistics needed to create user weather station files for SWAT. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/software/links-to-related-software/>>. Acesso em: 09 jul. 2013.

WINCHELL, M. et al. *ArcSWAT Interface for SWAT 2005, User's Guide*. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Texas Water Resources Institute, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, 2007. Disponível em: <http://www.geology.wmich.edu/sultan/5350/Labs/ArcSWAT_Documentation.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2012.

APÊNDICE A – Descrição dos processos hidrológicos do SWAT, conforme Neitsch (2005) em *SWAT Theoretical Documentation, Version 2005*

Interceptação e armazenamento no dossel – precipitação retida pela cobertura vegetal em folhas, galhos e troncos, e nas camadas liteira e húmus, que fica disponível para evaporação direta. É calculada diretamente se o método CN for usado para estimar o escoamento superficial. E, separadamente, pelo método de infiltração a fim de que seja removido antes do cálculo da evaporação. Neste caso, o modelo permite que seja informada a quantidade máxima de água que pode ser armazenada com base no índice de área foliar. A cada intervalo de tempo, primeiro a precipitação é retida pelo dossel, e contabilizados os excessos que alcançam a superfície dos solos.

Infiltração – entrada de água no perfil do solo a partir da superfície. À medida que a infiltração prossegue seu conteúdo de umidade aumenta. A taxa inicial de infiltração do solo depende do valor da umidade inicial anterior ao início da introdução de água no perfil, por precipitação e/ou irrigação, e diminui, conforme aumenta o conteúdo de umidade até que atinja um valor constante, correspondente à saturação da superfície dos solos. O processo ocorre porque a água na superfície do solo tem potencial total aproximadamente nulo e a água no solo tem potencial negativo. No início, com o solo relativamente seco, o potencial matricial é relativamente grande em relação ao potencial gravitacional. Com o umedecimento do solo e redução do potencial matricial passa a prevalecer o potencial gravitacional. Em maior ou menor grau diversos fatores do solo estão associados à infiltração, como estrutura e textura, massa específica, teor de matéria orgânica, porosidade, composição granulométrica, presença de óxidos de Fe e Al, além da umidade, capacidade de retenção e condutividade hidráulica.

Redistribuição – movimento contínuo da água através do perfil do solo depois de ter havido a interrupção da infiltração na superfície. A redistribuição deve-se às diferenças no conteúdo de água no perfil e cessa no instante em que o conteúdo de água torna-se uniforme. O modelo simula o movimento da água na camada do solo. A percolação ocorre se o conteúdo exceder a capacidade de campo e a camada abaixo saturada. A taxa de percolação é governada pela condutividade hidráulica do solo. A redistribuição também pode ser afetada pela temperatura do solo. Não ocorre o movimento da água se a temperatura no solo for igual ou menor do que 0°C.

Evapotranspiração – processos pelos quais a água na fase líquida ou sólida, na superfície ou próxima a ela, transforma-se em vapor de água e passa a integrar a atmosfera. Inclui a evaporação de rios e lagos, dos solos sem cobertura vegetal e superfícies vegetadas, da transpiração das plantas e da sublimação a partir do gelo e superfícies cobertas de neve. O solo, as plantas e a atmosfera podem ser considerados como componentes de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico, no qual os vários processos de fluxo estão interligados. O modelo calcula diretamente a evaporação logo que há interceptação vegetal, no caso do método CN e, separadamente, no método de infiltração Green & Ampt. A evaporação potencial do solo é estimada como função da evapotranspiração potencial e do índice de área foliar. A evaporação real do solo é estimada como função da profundidade do solo e do conteúdo de água disponível. A transpiração das plantas depende da relação linear entre a evapotranspiração potencial e o índice de área foliar.

Escoamento subterrâneo lateral – a água no perfil do solo que não evapora contribui para o fluxo lateral que ocorre abaixo da superfície e acima da zona saturada. O fluxo lateral no perfil é calculado simultaneamente com a redistribuição nos primeiros dois metros. Um modelo específico baseado na equação de balanço de massa é usado para prever o valor do fluxo em cada camada, considerando a variação da condutividade hidráulica, declividade e conteúdo de água no solo.

Escoamento superficial – fluxo que ocorre ao longo da superfície dos solos com declive. Usando registros de precipitação diários e o método CN o modelo calcula diretamente o volume do escoamento superficial com base no parâmetro de retenção que varia por causa das condições de uso do solo, tipo de solo, declividade e com o tempo, por causa da variação da umidade antecedente no perfil do solo. Usando registros de precipitação subdiários e o método de Green & Ampt o modelo calcula o escoamento superficial pelo excesso de infiltração. A função CN varia não linearmente com o conteúdo de umidade do solo. Decai à medida que o solo aproxima-se do ponto de murcha permanente e aumenta até o valor máximo, próximo da saturação. O método Green & Ampt calcula a infiltração como função do potencial matricial da frente úmida, da condutividade hidráulica efetiva, das características granulométricas do solo e do parâmetro CN, este aplicado na equação de infiltração modificada. A água que não infiltra gera o escoamento superficial. Em solos congelados secos o escoamento superficial tende a aumentar, mas uma taxa de infiltração significativa pode ocorrer se o solo congelado não está seco.

Vazão de pico – indicador da força erosiva das chuvas intensas, sendo usada no cálculo da perda de sedimentos. A vazão de pico é obtida a partir da modificação do método Racional modificado. Neste método a taxa de vazão de pico é função da proporção da precipitação diária que cai durante o tempo de concentração da bacia hidrográfica. A proporção de precipitação é estimada como função do total diário usando uma técnica estocástica. O tempo de concentração é estimado usando a fórmula de Manning para os fluxos superficiais e dos canais.

Perdas em trânsito (amortecimento, “transmission losses”) – perdas através do leito dos canais. Esta perda é efêmera e intermitente em canais onde a contribuição de água subterrânea ocorre apenas em certas épocas do ano ou não ocorrem (bacias semiáridas e áridas). O modelo usa o método Lane para estimá-las em função da largura e comprimento do canal, e duração do fluxo. Tanto o volume de escoamento superficial quanto a taxa de vazão de pico são ajustadas se as “perdas em trânsito” ocorrem em canais tributários.

Escoamento de base – vazão de contribuição originada no aquífero raso. O modelo divide as águas subterrâneas em aquífero raso (não confinado), que contribui com o fluxo de retorno para os cursos d’água na bacia hidrográfica, e em aquífero profundo (confinado), que contribui com o fluxo de retorno para os cursos d’água fora da bacia. A água que percola abaixo da zona das raízes é dividida em duas frações em que cada parte contribui para recarga de um dos aquíferos. Além do fluxo de retorno a água armazenada no aquífero raso pode reabastecer o perfil do solo em condições críticas de seca ou ser removida diretamente pelas raízes das plantas. A água existente nos dois aquíferos pode ser removida por bombeamento.

Reservatórios – estruturas de armazenamento que podem ocorrer ao longo da bacia hidrográfica, como lagos (“*ponds*”), áreas alagadas (“*wetlands*”) e reservatórios (“*reservoirs*”). O termo reservatório indica que o corpo hídrico está localizado no canal principal da sub-bacia, recebendo a contribuição de água da própria sub-bacia em que está situado e de montante. Os termos lagos e áreas alagadas indicam que o corpo hídrico está localizado na sub-bacia fora do canal principal. Neste caso, a área de captação é definida como uma fração do total da área da sub-bacia e que nunca recebe contribuição de montante. O armazenamento da água é função de sua capacidade máxima, entradas/perdas diárias, percolação e evaporação. Estas estruturas são definidas pela capacidade de armazenamento e área máxima da superfície.

Na fase do ciclo hidrológico correspondente ao transporte da água e sólidos são relevantes os conceitos relacionados com os dois tipos de canais definidos em uma sub-bacia:

Canal principal – cada sub-bacia está associada a um canal principal. O conjunto dos canais forma a rede de drenagem da bacia hidrográfica. Todas as cargas (vazão e sólidos) da sub-bacia são transferidas para o canal principal, que também recebe o fluxo do canal de montante.

Canal tributário – canais secundários ou de mais baixa ordem que se separam do canal principal na bacia hidrográfica. Cada canal tributário em uma sub-bacia drena somente uma porção da sub-bacia e não recebe contribuição de água subterrânea ao seu fluxo. Todos os fluxos nos canais tributários são transmitidos e propagados para o canal principal da sub-bacia. O modelo usa os atributos dos canais tributários para determinar o tempo de concentração da sub-bacia. O canal tributário define o caminho mais longo na sub-bacia. Se o canal principal for o caminho mais longo na sub-bacia o canal tributário coincide com ele.

APÊNDICE B – Dados da cobertura vegetal da microbacia

Tabela 14 – Parâmetros de crescimento de vegetação (pastagem) fornecidos pelo *Land cover/Plant Growth database*

Parâmetro	Valor	Unidade	Descrição
CPNM	PAST	---	Cobertura do solo/cultura
IDC	PERENNIAL	---	Classificação da cobertura do solo/cultura
BIO_E	35,0	(kg/ha)/(MJ/m ²)	Produção de biomassa
HVSTI	0,9	(kg/ha)/(kg/ha)	Índice de colheita
BLAI	4	m ² / m ²	Índice de área máxima foliar
FRGRW1	0,05	fração	Fração de crescimento sazonal da planta correspondente ao 1º ponto da curva de crescimento foliar
LAIMX1	0,05	fração	Fração de índice de área foliar máximo correspondente ao 1º ponto da curva de crescimento foliar
FRGRW2	0,49	fração	Fração de crescimento sazonal da planta correspondente ao 2º ponto da curva de crescimento foliar
LAIMX2	0,95	fração	Fração de índice de área foliar máximo correspondente ao 2º ponto da curva de crescimento foliar
DLAI	0,99	fração	Fração de crescimento sazonal da planta quando a área foliar começa a diminuir
CHTMX	0,5	m	Altura máxima da copa
RDMX	2	m	Profundidade máxima da raiz
T_OPT	25	°C	Temperatura ótima para crescimento da planta
T_BASE	12	°C	Temperatura mínima para crescimento da planta
CNYLD	0,0234	kg N/kg semente	Fração de nitrogênio na semente
CPYLD	0,0033	kg P/kg semente	Fração de fósforo na semente
BN1	0,06	kg N/kg biomassa	Fração de N na planta em crescimento
BN2	0,0231	kg N/kg biomassa	Fração de N na planta no meio da maturidade
BN3	0,0134	kg N/kg biomassa	Fração de N na planta na maturidade
BP1	0,0084	kg P/kg biomassa	Fração de P na planta em crescimento
BP2	0,0032	kg P/kg biomassa	Fração de N na planta no meio da maturidade
BP3	0,0019	kg P/kg biomassa	Fração de P na planta na maturidade
WSYF	0,9	(kg/ha)/(kg/ha)	Índice mínimo de colheita
USLE_C	0,003	---	Menor fator C de USLE aplicável à cobertura do solo/cultura
GSI	0,005	m/s	Condutância máxima estomática (em condição seca)
VPDFR	4	kPa	Déficit de pressão de vapor correspondente à fração da condutância máxima estomática definida por FRGMAX
FRGMAX	0,75	fração	Fração de condutância máxima estomática em alto déficit de pressão de vapor
WAVP	10	taxa	Taxa de declínio no uso eficiente de radiação por incremento de unidade no déficit de pressão de vapor
CO2HI	660	uL/L	Alta concentração de CO ₂ atmosférico
BIOEHI	36	razão	Proporção de energia-biomassa correspondente ao 2º ponto da curva de eficiência de uso da radiação
RSDCO_PL	0,05	fração	Coefficiente de decomposição residual da planta
CROPNAME	PASTURE	---	Nome da cultura
OV_N	0,15	---	Coefficiente de Manning para o escoamento de superfície
FERTFIELD	"No"	---	Para indicar quando há fertilização da cultura
ALAI_MIN	0	m ² / m ²	Índice mínimo de área foliar na dormência
BIO_LEAF	0	fração	Fração de biomassa convertido em resíduo na dormência
EXT_COEF	0,65	---	Coefficiente de radiação fotossintética interceptada
CN2B	69	---	Curva Número para condição II de umidade
BM_DIEOFF	0,1	---	Biomass die-off fraction

Fonte: SWAT2005 Geodatabase.

APÊNDICE C – Dados dos solos da microbacia

Tabela 15 – Parâmetros físico-hídricos dos solos inseridos no *User soils database*
(apenas os dados dos solos remanescentes depois da geração das URHs)

SNAM	SOIL_LAYER	SOL_Z (mm)	SOL_BD (g/cm ³)	SOL_AWC (mm H ₂ O/ mm)	SOL_CNB (% wg.)	SOL_K (mm/hr)	CLAY (%wg.)	SILT (%wg.)	SAND (%wg.)	ROCK (%wg.)	SOL_ALB (fraction)
CXve1	1	300	1,47	0,07	1,44	6,07	17,00	17,10	65,90	0,00	0,20
	2	430	1,46	0,07	0,94	6,82	22,00	18,30	59,70	0,00	0,20
	3	700	1,63	0,06	0,69	2,89	22,00	14,90	63,10	0,00	0,20
	4	1150	1,40	0,08	0,33	1,91	18,30	14,80	66,90	4,00	0,20
	5	1600	1,40	0,10	0,34	1,77	22,40	22,30	55,30	3,50	0,20
CXve2	1	200	1,38	0,08	1,56	8,66	23,00	21,60	55,40	0,00	0,20
	2	300	1,39	0,08	1,04	8,61	25,50	25,45	49,05	0,00	0,20
	3	500	1,47	0,07	0,63	6,22	24,00	26,70	49,30	0,00	0,20
	4	1080	1,37	0,10	0,21	2,10	20,45	19,00	60,55	4,95	0,20
CXve3	1	200	1,38	0,08	1,56	8,66	23,00	21,60	55,40	0,00	0,20
	2	300	1,39	0,08	1,04	8,61	25,50	25,45	49,05	0,00	0,20
	3	500	1,47	0,07	0,63	6,22	24,00	26,70	49,30	0,00	0,20
	4	1080	1,37	0,10	0,21	2,10	20,45	19,00	60,55	4,95	0,20
RLve	1	105	1,34	0,08	2,07	9,33	18,00	22,00	60,00	0,00	0,20
	2	320	1,40	0,08	1,67	7,53	18,50	20,70	60,80	0,00	0,20
PVAd	1	230	1,60	0,09	1,59	3,11	20,00	16,50	63,50	0,00	0,20
	2	300	1,55	0,08	0,99	3,71	29,00	17,00	54,00	0,00	0,20
	3	590	1,48	0,07	1,01	5,35	50,00	18,10	31,90	0,00	0,20
	4	700	1,58	0,08	0,69	3,59	43,00	25,70	31,30	0,00	0,20
	5	960	1,35	0,17	0,23	2,17	45,10	30,30	24,60	0,00	0,20
	6	1060	1,39	0,16	0,18	2,29	41,00	29,20	29,80	0,00	0,20
	7	1410	1,40	0,15	0,15	1,75	34,80	31,80	33,40	0,00	0,20

*** Parâmetros dos solos:**

SNAM – Nome dado ao solo

CXve1 - Cambissolo Háplico gleico

CXve2 e CXve3 - Cambissolo Háplico léptico

PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo

RLve - Neossolo Litólico

SOIL_LAYER (#) – Camada do solo

SOL_Z (mm) – Profundidade da superfície até a base

SOL_BD (g/cm³) – Densidade volumétrica saturada

SOL_AWC (mm H₂O/mm solo) – Disponibilidade de água

SOL_CNB (% em peso) – Conteúdo de carbono orgânico

SOL_K (mm/hr) – Condutividade hidráulica saturada

CLAY (% em peso) – Conteúdo de argila

SILT (% em peso) – Conteúdo de silte

SAND (% em peso) – Conteúdo de areia

ROCK (% em peso) – Conteúdo de fragmentos de rocha

SOL_ALB (fração) – Albedo do solo saturado

Fonte: EMBRAPA SOLOS e OTTONI, 2005.

APÊNDICE D – Dados do gerador de clima da microbacia

Tabela 16 – Dados do gerador climático inseridos no *User weather stations database*

Variáveis climáticas	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX (°C)	32,58	33,33	32,32	30,71	28,41	27,72	27,52	28,60	29,21	30,24	30,35	31,53
TMPMN (°C)	22,31	22,41	22,10	20,67	17,88	15,96	15,67	16,35	18,04	19,87	21,02	21,84
TMPSTDMX (°C)	3,17	2,80	2,72	2,81	2,65	2,77	3,11	3,39	3,99	3,94	3,94	3,11
TMPSTDMN (°C)	1,25	1,18	1,28	1,86	2,28	2,31	2,31	2,49	2,09	1,92	1,77	1,42
PCPMM (mm)	210,10	118,16	132,27	68,54	36,98	20,87	14,54	21,93	59,56	98,51	182,99	259,76
PCPSTD (mm)	14,03	9,64	11,78	6,63	4,66	3,29	2,14	3,25	7,08	8,42	13,03	15,15
PCPSKW	2,95	2,98	4,54	4,16	5,90	6,63	9,11	7,84	5,67	3,62	3,42	2,89
PR-W1	0,26	0,22	0,23	0,21	0,17	0,10	0,09	0,09	0,15	0,22	0,35	0,42
PR-W2	0,64	0,58	0,57	0,45	0,34	0,28	0,58	0,54	0,55	0,60	0,67	0,71
PCPD (n° de dias)	13,39	10,00	10,61	8,28	6,44	3,72	5,11	5,17	7,83	10,22	15,39	17,94
RAINHHMX (mm)	18,10	12,20	10,60	14,30	12,00	3,40	2,30	1,20	14,40	18,50	19,40	13,10
SOLARAV (MJ/m ² dia)	41,23	39,06	34,82	29,76	25,20	23,21	24,44	28,15	33,34	37,54	40,39	41,35
DEWPT (°C)	22,98	23,03	22,78	21,77	19,50	18,37	17,73	17,72	18,70	20,22	21,40	22,82
WNDV (m/s)	1,34	0,89	1,07	0,88	0,79	0,78	0,91	1,19	1,51	1,53	1,31	1,06

*** Variáveis climáticas:**

WLATITUDE (grau decimal) – Latitude da estação usada para criar os parâmetros estatísticos = -21,38

WELEV (m) – Altitude da estação climática = 149

RAYN_YRS – Número de anos para calcular RAINHHMX = 5

TMPMX (°C) – Média mensal das temperaturas máximas diárias do ar

TMPMN (°C) – Média mensal das temperaturas mínimas diárias do ar

TMPSTDMX (°C) – Desvio padrão da temperatura máxima diária do ar no mês

TMPSTDMN (°C) – Desvio padrão da temperatura mínima diária do ar no mês

PCPMM (mm) – Precipitação total mensal

PCPSTD (mm) – Desvio padrão da precipitação diária no mês

PCPSKW – Coeficiente de assimetria para precipitação diária no mês

PR-W1 – Probabilidade de um dia úmido ocorrer depois de um dia seco no mês

PR-W2 – Probabilidade de um dia úmido ocorrer depois de um dia úmido no mês

PCPD (n° de dias) – Número de dias com chuva no mês

RAINHHMX (mm) – Precipitação mensal máxima de 30 minutos

SOLARAV (MJ/m² dia) – Média mensal das radiações solares diárias

DEWPT (°C) – Média mensal das temperaturas do ponto de orvalho diárias

WNDV (m/s) – Média mensal das velocidades do vento diárias

Fonte: Calculado com base na estação climática do INMET de Itaperuna (1990-2010 e 2004-2008).

APÊNDICE E – Demais parâmetros da microbacia

Tabela 17 – Parâmetros do *input file* “unidade de resposta hidrológica” (.hru)

0,1695790	HRU_FR: Fração da área da sub-bacia contida na URH
50,000	SLSUBBSN: Comprimento médio do declive superficial [m]
CXve1 0,067	HRU_SLP: Declividade média na URH [m/m]
CXve2 0,440	HRU_SLP: Declividade média na URH [m/m]
CXve3 0,301	HRU_SLP: Declividade média na URH [m/m]
PVAd 0,307	HRU_SLP: Declividade média na URH [m/m]
RLve 0,557	HRU_SLP: Declividade média na URH [m/m]
Valores considerados igualmente em todas as URHs:	
0,150	OV_N: Coeficiente de Manning para escoamento de superfície
0,000	LAT_TTIME: Tempo de deslocamento do fluxo lateral [dias]
50,000	SLSOIL: Comprimento do declive para o fluxo subsuperficial lateral [m]
30,000	CANMX: Interceptação máxima pelo dossel [mm]
0,700	ESCO: Fator de compensação da evaporação do solo
1,000	EPCO: Fator de compensação da remoção de água pelas raízes

Fonte: Pasta Scenarios/Txtinout do “diretório de trabalho”.

Tabela 18 – Parâmetros do *input file* “água subterrânea” (.gw)

0,5000	SHALLST: Profundidade inicial do lençol freático [mm]
1000,0000	DEEPST: Profundidade inicial do aquífero confinado [mm]
31,0000	GW_DELAY: Tempo para recarga do aquífero raso [dias]
0,3000	ALPHA_BF: Constante de recessão do escoamento de base [dias]
500,0000	GWQMN: Profundidade do aquífero raso para o escoamento de base ocorrer [mm]
0,2000	GW_REVAP: Coeficiente para haver retorno da água do aquífero raso para a zona de raízes
500,0000	REVAPMN: Profundidade do aquífero raso para ocorrer o “revap” [mm]
0,0500	RCHRG_DP : Fração de água que percola da zona de raízes para o aquífero confinado

Fonte: Pasta Scenarios/Txtinout do “diretório de trabalho”.

Tabela 19 – Parâmetros do *input file* “manejo do solo” (.mgt)

Parâmetros Iniciais de Crescimento de Vegetação:	
0	IGRO: Status para a cobertura: 0-não há cultura em crescimento
Parâmetros Gerais de Manejo:	
CN2	69

Fonte: Pasta Scenarios/Txtinout do “diretório de trabalho”.

Tabela 20 – Parâmetros do *input file* “canal principal” (.rte)

5,983	CHW2: Largura do canal principal [m]
0,362	CHD: Profundidade do canal principal [m]
0,01627	CH_S2: Declividade do canal principal [m/m]
4,925	CH_L2: Comprimento do canal principal [km]
0,014	CH_N2: Coeficiente de Manning para o canal principal
0,000	CH_K2: Condutividade hidráulica efetiva no canal principal [mm/hr]
0,000	CH_COV: Fator de cobertura do canal
16,548	CH_WDR: razão largura-profundidade do canal [m/m]
0,000	ALPHA_BNK: Fator de transmissividade do escoamento de base das margens [dias]

Fonte: Pasta Scenarios/Txtinout do “diretório de trabalho”.

Tabela 21 – Parâmetros do *input file* “sub-bacia” (.sub)

13,500000	SUB_KM: Área da sub-bacia [km ²]
-21,393656	LATITUDE: Latitude da sub-bacia [graus]
206,52	ELEV: Altitude da sub-bacia [m]
1	IRGAGE: Número de estações de precipitação na sub-bacia
Canais Tributários:	
6,058	CH_L1: Canal tributário mais long [km]
0,083	CH_S1: Declividade media do canal tributári [m/m]
5,983	CH_W1: Largura media do canal tributário [mm/km]
0,500	CH_K1: Condutividade hidráulica efetiva no canal tributário [mm/hr]
0,014	CH_N: Coeficiente de Manning para canais tributários

Fonte: Pasta Scenarios/Txtinout do “diretório de trabalho”.

Tabela 22 – Parâmetros do *input file* “bacia hidrográfica” (.bsn)

Opções de Modelagem: Fase Terrestre:	
Balanço hídrico:	
2	IPET: PET Método: 2=Hargreaves
0,700	ESCO: Fator de compensação da evaporação do solo
1,000	EPCO: Fator de compensação da remoção de água pelas raízes
0,000	EVLA1: Índice de área foliar na qual não há evaporação [m ² /m ²]
0,000	FFCB: Conteúdo inicial de água no solo expresso como fração do conteúdo da capacidade de campo
Escoamento superficial:	
3	IEVENT: 3= chuva subdiária / método de infiltração Green & Ampt / saída horária
0	ICRK: Código do fluxo em vertissolos: 0=não modela
4,000	SURLAG: Atraso no escoamento superficial [dias]
Opções de Modelagem: Canais:	
0	IRTE: Método de roteamento da água: 0=armazenamento variável
0	IDEG: Código de degradação do canal: 0=dimensões permanecem constantes na simulação
0	IWQ: Código de que há transformação de nutrientes e pesticidas: 0=não há

Fonte: Pasta Scenarios/Txtinout do “diretório de trabalho”.

Tabela 23 – Parâmetros do *input file* “configurações e opções de modelagem” (file.cio)

Clima:	
0	IGEN: Número randômico usado para gerar dados de clima: 0=considera números padrão
1	PCPSIM: Código de simulação da precipitação: 1=medida
15	IDT: Intervalo de tempo da precipitação (minutos)
1	IDIST: Código de distribuição da precipitação: 1=exponencial
0,300	REXP: Expoente para IDIST
2	TMPSIM: Código de simulação da temperatura: 2=simulada
2	SLRSIM : Código de simulação da radiação solar: 2=simulada
2	RHSIM : Código de simulação da umidade relativa: 2=simulada
2	WINDSIM : Código de simulação da velocidade do vento: 2=simulada

Fonte: Pasta Scenarios/Txtinout do “diretório de trabalho”.