

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

**MODELAGEM E CENÁRIOS HIDROLÓGICOS EM
BACIA REPRESENTATIVA DA MATA ATLÂNTICA NO
SUL DO BRASIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Iris Rodrigues Marcon

Santa Maria, RS, Brasil

2013

**MODELAGEM E CENÁRIOS HIDROLÓGICOS EM BACIA
REPRESENTATIVA DA MATA ATLÂNTICA NO SUL DO
BRASIL**

por

Iris Rodrigues Marcon

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva
Co-Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva

Santa Maria, RS, Brasil

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Marcon, Iris Rodrigues
Modelagem e Cenários Hidrológicos em Bacia
Representativa da Mata Atlântica no Sul do Brasil / Iris
Rodrigues Marcon.-2013.
89 f.; 30cm

Orientadora: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva
Coorientador: João Batista Dias de Paiva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2013

1. Modelagem Hidrológica 2. SWAT 3. Cenários
Climáticos Futuros I. Paiva, Eloiza Maria Cauduro Dias
de II. Paiva, João Batista Dias de III. Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**MODELAGEM E CENÁRIOS HIDROLÓGICOS EM BACIA
REPRESENTATIVA DA MATA ATLÂNTICA NO SUL DO BRASIL**

elaborada por
Iris Rodrigues Marcon

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

COMISSÃO EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. Adilson Pinheiro
Examinador Externo (FURB)


Prof. Dr. Daniela Guzzon Sanagiotto
Examinador Interno (UFSM)

Santa Maria, 27 agosto de 2013.

"Estudar as manifestações da natureza é trabalho que agrada a Deus. É o mesmo que rezar, que orar. Procurar conhecer as leis naturais, glorificando o primeiro inventor, o Artista do Universo, se aprende a amá-lo, pois que um grande amor a Deus nasce de um grande saber."

Leonardo da Vinci

**Para minha família,
com amor.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

À minha família, pelo amor, apoio, incentivo e compreensão.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial ao grupo GHIDROS (Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFSM), que possibilitaram a realização do curso de mestrado.

À Prof^a. Dr^a. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva e ao Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva, com carinho, pela orientação, ensinamentos, oportunidade, amizade e incentivos durante a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial, ao Prof. Dr. Daniel Allasia Piccili e ao Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro pelo aprendizado, orientação e amizade.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial Fábio Alex Belling, Leandro Pereira, Lorenza Ferreira Oppa, Luciano Faustino da Silva, Michele Moro, Rafael Feltrin, Ricardo Pattat, Vander Kaufmann e Vanessa Sari, pelo auxílio e amizade.

Aos servidores técnicos Alcides Sartori e José Astério Rosa do Carmo pelo auxílio nos trabalhos de campo, amizade e apoio.

A servidora administrativa Marília Nunes Goulart, pelo auxílio e amizade.

Ao Departamento de Fitotecnia da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria e ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) pelo fornecimento dos dados climáticos utilizados para calibração e verificação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Ao MCT/FINEP/AÇÃO TRANSVERSAL - Previsão de Clima e Tempo 04/2008, convênio 1406/08, projeto 01.08.0568.00 pelo financiamento da pesquisa, ao Dr. José A. Marengo, do INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais), pela disponibilização dos dados gerados pelo modelo Precip (Providing Regional Climates for Impacts Studies) - Hadley Center, o HadRM3P.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudo em nível de mestrado.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelas bolsas concedidas para realização deste projeto.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Adilson Pinheiro e Prof^a. Dr^a. Daniela Guzzon Sanagiotto, por aceitar esse convite e por contribuir no aprimoramento deste trabalho.

A todos que colaboraram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho, muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. OBJETIVOS.....	5
1.1.1. Objetivo Geral.....	6
1.1.2. Objetivos Específicos.....	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1. Identificação e Caracterização da Bacia Hidrográfica.....	6
2.2. Pequenas Bacias Hidrográficas.....	7
2.3. Importância do Estudo da Quantificação de Vazões.....	8
2.4. Medições de Vazões.....	9
2.4.1. Precipitação.....	10
2.4.2. Escoamento Fluvial.....	10
2.5. Modelagem Hidrológica.....	12
2.6. Sistema de Informações Geográficas (SIG).....	15
2.7. SWAT (Soil and Water Assessment Tool).....	17
2.7.1. Estrutura do Modelo SWAT.....	22
2.7.1.1. Produção de Água.....	22
2.7.1.1.1. Escoamento Superficial (Q).....	22
2.7.1.1.2. Evapotranspiração (ET).....	23
2.7.1.1.3. Percolação (P).....	25
2.7.1.1.4. Taxa de Escoamento de Pico.....	26
2.7.1.1.5. Escoamento Lateral (qlat).....	26
2.7.1.1.6. Tempo de Concentração.....	27
2.7.1.1.7. Retardo do Escoamento Superficial.....	28
2.7.1.1.8. Armazenamento no Dossel.....	28
2.7.1.1.9. Água no Solo.....	28
2.7.1.2. Água Subterrânea.....	29

2.7.1.3. Propagação no Canal.....	31
2.7.1.3.1. Propagação da Vazão Líquida no Canal.....	31
2.7.1.4. Propagação no Reservatório.....	32
2.7.1.4.1. Propagação da Vazão Líquida no Reservatório.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. Caracterização Geral.....	34
3.2. Caracterização do Clima de Santa Maria.....	36
3.3. Dados de Entrada do Modelo SWAT.....	38
3.3.1. Informações Cartográficas e Classificação dos Solos da Bacia.....	40
3.4. Calibração e Verificação do Modelo SWAT.....	34
3.5. Cenários Climáticos Futuros.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1. Calibração e Verificação do Modelo SWAT.....	50
4.2. Cenários Climáticos Futuros.....	63
5. CONCLUSÃO.....	70
6. RECOMENDAÇÕES.....	71
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

RESUMO

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

MODELAGEM E CENÁRIOS HIDROLÓGICOS EM BACIA REPRESENTATIVA DA MATA ATLÂNTICA NO SUL DO BRASIL

Autora: Iris Rodrigues Marcon

Orientadora: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva

Co-Orientador: João Batista Dias de Paiva

Data e Local da Defesa: Santa Maria, agosto de 2013.

As ações antrópicas modificam o meio ambiente e aumentam o processo de degradação dos recursos hídricos, os quais são limitados e fundamentais à manutenção da vida. Deste modo, é vital que estes recursos sejam quantificados, para que possam ser avaliados e protegidos, em busca da auto-sustentabilidade. A aplicação de um modelo hidrológico possibilita a simulação de diferentes cenários, constituindo-se uma ferramenta de planejamento e gestão para o respectivo comitê da bacia, onde alternativas de uso poderão ser simuladas e medidas previamente para a preservação da mesma. Processos hidrológicos, como as variáveis climáticas, alteram o regime hídrico e a resposta hidrológica da bacia. Este trabalho apresenta os resultados da simulação com o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) em uma pequena bacia representativa do Bioma Mata Atlântica, no Sul do Brasil (latitude 29°38'37,49" e longitude 53°48'21,99"), monitorada por duas estações fluviográficas/pluviográficas sequenciais, com área de contribuição de 4,5 Km² e 12 km² respectivamente. As altitudes na bacia variam de 316,21 m a 431,21 m e a cobertura vegetal predominante é composta por 55% de mata nativa e 39 % de campo nativo. O período simulado foi de junho de 2008 a dezembro de 2009, correspondendo ao período de monitoramento. A temperatura variou entre -2,2 °C a 39,2 °C. A precipitação média anual variou entre 2005 mm e 2250 mm. A qualidade do ajuste dos resultados foi caracterizada pelo índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e pelo coeficiente de determinação R². O modelo foi avaliado na escala mensal e diária. Na escala mensal os valores obtidos para NSE, na fase de calibração, foram de 0,80 e 0,60, respectivamente para as duas seções. Os valores obtidos para o R² foram 0,81 e 0,61 nas mesmas seções. Na escala diária os valores obtidos para NSE, na fase de calibração, foram de 0,36, para ambas as seções e os valores obtidos para o R² foram 0,38 e 0,37 nas respectivas seções. Estes resultados mostram que o ajuste foi satisfatório para valores mensais, o mesmo não ocorrendo para valores diários. Devido ao pequeno período de monitoramento, para a verificação da qualidade do ajuste dos resultados do modelo utilizou-se os resultados obtidos na seção fluviométrica intermediária, com área de 4,5 Km². Os valores obtidos para o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) na verificação foram 0,75 para simulação mensal e 0,37 para a simulação diária e os valores obtidos para o coeficiente de determinação (R²) foram 0,75 para valores mensais e 0,37 para valores diários, o que valida o ajuste obtido. Estes resultados estão em concordância com os valores encontrados por Paiva e Paiva (2006), que avaliaram o SWAT em uma seção de jusante, na mesma bacia, com área de 18 km². Os resultados mostram que o modelo SWAT se adapta bem nesta região com discretização mensal. Provavelmente, os baixos valores de ajuste na calibração diária e os principais problemas de utilização do modelo são devidos ao tamanho da bacia, ao pequeno período de dados e a necessidade de maiores informações sobre a caracterização física do solo. Os cenários climáticos futuros A2 (reflete a alta emissão de gases de efeito estufa, sendo considerado pessimista) e B2 (reflete a baixa emissão de gases de efeito estufa, sendo considerado otimista) mostraram que as vazões máximas poderão alcançar valores mais extremos no futuro; as temperaturas médias, máximas e mínimas apresentaram uma variação aproximada de 1°C. O cenário A2 considerado pessimista apresentou valores mais extremos tanto para vazão calculada como para os dados de entrada.

Palavras-chave: Modelagem Hidrológica, SWAT, Cenários Climáticos Futuros.

ABSTRACT

Master Course Dissertation
Graduate Program in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

MODELING AND SCENARIOS HYDROLOGIC IN A WATERSHED REPRESENTATIVE OF THE ATLANTIC FOREST IN SOUTHERN BRAZIL

Author: Iris Rodrigues Marcon
Adviser: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva
Co- Adviser: João Batista Dias de Paiva
Defense Place and Date: Santa Maria, August, 2013.

Human actions modify the environment and increase the degradation of water resources, which are limited and fundamental to the maintenance of life. Thus, it is vital that these resources are quantified, so they can be evaluated and protected, in search of self-sustainability. The application of a hydrological model allows the simulation of different scenarios, becoming a tool for planning and management for the respective committee of the basin, where alternative uses can be simulated beforehand and measures for the preservation of the same. Hydrological processes, such as climatic variables, change the water regime and the hydrological response of the basin. This study presents the results of the simulations with the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model in a small watershed in Southern Brazil (latitude 29°38'37.49" and longitude 53°48'21.99"), representative of the Atlantic Forest biome. This area was monitored by two sequential stations, each one with one rain gauge and one stage gauge, having a contribution area of 4.5 km² and 12 km² respectively. The altitudes in the basin range from 316 m to 431 m and vegetation is predominantly composed of 55% of native forest and 39% of native pasture. The simulated period was from June 2008 to December 2009, corresponding to the period of monitoring. The temperature ranged from -2.2°C to 39.2°C. The annual rainfall average ranged between 2005 mm and 2250 mm. The quality of the results was characterized by the Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) and by the coefficient of determination (R²). The model was evaluated in a monthly and daily time step. At the monthly time step, the values obtained for NSE, in the calibration phase, were 0.80 and 0.60, respectively for the two sections. The values obtained for the R² were 0.81 and 0.61 in the same sections. In the daily time step, values obtained for NSE, in the calibration phase, was 0.36, for both sections. For R², these values were 0.38 and 0.37 in the respective sections. These results show that the fit was good for monthly values, but not for the daily. Due to the short period of monitoring, the validation of the model results was realized with the observed data from the middle section, with an area of 4.5 km². The values obtained for the NSE in the validation phase were 0.75 and 0.37 for the monthly and daily time step respectively, and for R², 0.75 and 0.37 for the monthly and daily values, which validate the fit. These results are in agreement with the values found by Paiva and Paiva (2006), who evaluated the SWAT in a downstream section, in the same basin, with an area of 18 km². These results show that the SWAT model fits well in this region with monthly time step. Probably, the low values of the adjustment for the daily time step and the main problems of using the model are due to the size of the basin, the short period of observed data and the need for more information on the physical characterization of the soil. Future climatic scenarios A2 (reflects the high emission of greenhouse gases and is considered pessimist) and B2 (reflects the low emission of greenhouse gases and is considered optimist) show that the maximum flows reach more extreme values in the future, the average temperature, maximum and minimum showed a variation of about 1° C. The pessimistic scenario considered A2 showed more extreme values so calculated as to the input data of water flow.

Key words: Hydrological Modeling, SWAT, Future Climatic Scenarios.

1. INTRODUÇÃO

As ações antrópicas modificam o meio ambiente e aumentam o processo de degradação dos recursos hídricos, os quais são limitados e fundamentais à manutenção da vida. Deste modo, é vital que estes recursos sejam quantificados, para que possam ser avaliados e protegidos, em busca da auto-sustentabilidade.

Determinar e conhecer os valores quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos, considerando-se sua distribuição temporal e espacial, é essencial, pois permite a avaliação das respostas hidrológicas da bacia e as conseqüências para a região em que a mesma está inserida, auxiliando no planejamento e gestão dos recursos hídricos e reduzindo o impacto ambiental. Porém, para tanto, é necessário a implantação de um sistema de monitoramento hidrológico, de longo período. Tais informações estão disponíveis apenas em grandes bacias hidrográficas e em áreas de grande interesse econômico. Os modelos de simulação hidrológica têm grande aplicabilidade na geração de informações não disponíveis.

O emprego de um modelo hidrológico torna possível a simulação de diferentes cenários de uso e possíveis impactos que podem ocorrer na bacia. Logo, constitui-se uma importante ferramenta de planejamento e gestão para o respectivo comitê da bacia, onde alternativas de uso poderão ser simuladas e medidas previamente para identificação de áreas críticas e preservação da mesma, e, por conseguinte, da região em que a mesma está inserida. Entretanto, a análise de uma ferramenta como esta, só é possível através de um projeto de monitoramento, pois é a partir deste que são obtidas as informações que alimentam o banco de dados do modelo para a realização das suas simulações. O uso de modelos reduz custos e otimiza o tempo, contribuindo para a gestão dos recursos hídricos.

Existe um grande número de modelos disponíveis, variando com os objetivos, número de informações de entrada exigidas, escala espaço-temporal, que tentam reproduzir o ambiente físico de forma real.

Originalmente, a maioria dos modelos foi desenvolvida para simular apenas a hidrologia, sendo posteriormente adicionados os componentes de

qualidade da água. Como os sedimentos e demais poluentes são transportados através da água, se a resposta hidrológica não for aceitável, os demais processos também não serão. Portanto, um entendimento da fundamentação hidrológica é indispensável.

Para facilitar a interpretação dos dados pelos modelos são utilizadas técnicas de análise em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Segundo Veith et al. (2010), através do SIG os modelos hidrológicos estão sendo desenvolvidos e aplicados com maior embasamento físico, pois este torna possível a representação dos parâmetros dos modelos de forma distribuída. Esta ferramenta é destinada à aquisição e ao tratamento de dados georreferenciados, pois alimenta o banco de dados dos modelos em tempo real ou com pouco tempo de diferença, permitindo a manipulação de dados de diversas fontes, recuperando e combinando informações, e efetuando vários tipos de análise.

O SWAT é um modelo matemático que permite a simulação de diferentes processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica, atividades de pré-processamento, onde características das sub-bacias são obtidas através de mapas de elevação, uso e tipo de solo, visualização de resultados nas atividades de pós-processamento, constituindo uma ferramenta útil no processo de gerenciamento da bacia analisada.

Nesse âmbito, este trabalho tem por objetivo o monitoramento hidrológico e a aplicação do modelo SWAT em duas pequenas bacias embutidas representativas da Mata Atlântica, no Sul do Brasil, Rancho do Amaral (coordenadas 29°37'46,49" Latitude Sul e 53°48'39,60" Longitude Oeste) e Rincão do Soturno (coordenadas 29°38'37,49" Latitude Sul e 53°48'21,99" Longitude Oeste), sub-bacias do Rio Vacacaí Mirim, localizado em Santa Maria – RS, com a finalidade de gerar alternativas e auxiliar na administração das bacias monitoradas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa foi obter uma melhor compreensão e representação dos processos hidrológicos, em escala espaço-temporal, através do monitoramento e análise dos dados, aplicando o modelo SWAT em duas pequenas bacias representativas da Mata Atlântica, no Sul do Brasil, Rancho do Amaral (coordenadas 29°37'46,49" Latitude Sul e 53°48'39,60" Longitude Oeste) e Rincão do Soturno (coordenadas 29°38'37,49" Latitude Sul e 53°48'21,99" Longitude Oeste), sub-bacias do Rio Vacacaí Mirim, Santa Maria – RS.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Calibrar e validar o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para os dados de clima, uso e ocupação do solo no período monitorado;
- Através da análise dos dados hidrológicos da bacia, comparar os dados obtidos na simulação com os observados em campo;
- Verificar a aplicabilidade do modelo na região e confrontar com os resultados obtidos na sub-bacia Menino Deus I (coordenadas 29°39'49,8" Latitude Sul e 53°49'10,2" Longitude Oeste);
- Simular os cenários climáticos futuros A2 e B2, no período de 2071 a 2100, contribuindo para o planejamento e gestão dos recursos hídricos;
- Avaliar as respostas do modelo utilizando os dados monitorados e os cenários climáticos futuros gerados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Identificação e Caracterização da Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica é o principal objeto de estudo dos modelos hidrológicos, sendo que para melhor entendê-los, é preciso compreender os componentes envolvidos no ciclo hidrológico.

“O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre” (Silveira, 1997, p. 35).

Ar, solo e água fazem parte do meio ambiente como um todo, sendo vitais para a vida humana, sendo interligados por processos interativos com efeitos entre si e eles mesmos, que se propagam pelos outros, sendo alguns desconhecidos e outros sem quantificação (Singh, 1995).

Conforme Mediondo e Tucci (1997), os processos hidrológicos têm propriedades e características que variam com as escalas espaço - temporais, devido à grande heterogeneidade observada tanto no sistema quanto nos processos estudados. Logo, o ciclo hidrológico deve ser analisado de acordo com as características do sistema, sempre considerando a dinâmica de seus processos, que são altamente não-lineares.

Estudos que compreendem o ciclo hidrológico têm maior ênfase na superfície, onde o enfoque principal de debate é a bacia hidrográfica.

Na Lei 9.433 de oito de janeiro de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (Governo Federal, 2001), a bacia hidrográfica foi determinada como unidade territorial para planejamentos (BRASIL, 1997).

A bacia hidrográfica, devido às suas características naturais, é uma importante unidade espacial utilizada para gerenciar atividades de uso e conservação dos recursos naturais. O fluxo de matérias do solo, água, nutrientes e suas interações são dispostos dentro dos contornos da bacia hidrográfica pela dinâmica do comportamento da água, representando a unidade ecossistêmica da paisagem (HEWLETT, 1982; LIMA, 1997; KOBİYAMA, 1999 apud LOPES, 2008, p. 6).

As informações sobre chuva e vazão produzidas pelas redes hidrométricas do Brasil estão relacionadas às grandes bacias hidrográficas, pois visavam com a sua implantação,

produzir informações para futuros aproveitamentos hidrelétricos ou para a construção de grandes barragens destinadas ao abastecimento público.

O monitoramento de pequenas bacias hidrográficas apresenta uma série de dificuldades, principalmente quanto à incompatibilidade entre os tempos de ocorrência dos fenômenos a medir (cheias principalmente) e os tempos de locomoção da equipe de campo e de realização de amostragens.

Alguns parâmetros das bacias hidrográficas, devido às intervenções humanas no ambiente das mais variadas e diferentes formas e tipos, podem sofrer transformações no decorrer dos anos como é o caso da cobertura vegetal, ocupação ou urbanização, e a capacidade de absorção dos solos.

A variabilidade hidrológica é entendida com as alterações que possam ocorrer na entrada e saídas dos sistemas hidrológicos. As principais entradas são a precipitação e a evapotranspiração (que depende de outras variáveis climáticas), enquanto que as principais variáveis de saída são o nível e a vazão de um rio. Os principais efeitos da variabilidade hidrológica estão relacionados com a variabilidade natural dos processos climáticos; o impacto da modificação climática; e os efeitos do uso da terra e alteração dos sistemas hídricos (TUCCI, 2002).

A utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e recursos informatizados reduzem, significativamente, o tempo e o custo do estudo, classificações e atribuições de prioridades das atividades ligadas à bacia hidrográfica, fornece resultados mais precisos e permite simulações de alteração de um ou mais fatores que compõem a paisagem em estudo, para prever ou não impacto ambiental.

2.2. Pequenas Bacias Hidrográficas

Uma bacia hidrográfica é considerada pequena se apresentar algumas ou todas as seguintes propriedades:

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

Segundo Gregory & Walling (apud GOLDENFUM, 2001, p. 9), para a perfeita caracterização da bacia é fundamental um levantamento detalhado das seguintes características topográficas:

- ❖ Área e forma: praticamente todas as características da bacia estão correlacionadas com a área. A forma da bacia também pode ser decisiva quanto à tendência de respostas mais rápidas ou mais lentas do sistema (bacias “circulares” terão a tendência de respostas mais rápidas do que bacias “alongadas”). A delimitação da bacia deve ser efetuada da forma mais precisa possível, pois, em pequenas bacias, qualquer erro na área pode ser de grande importância relativa.
- ❖ Densidade da rede de drenagem: a densidade da rede de drenagem é um parâmetro de grande sensibilidade, uma vez que provê a ligação entre os atributos de forma da bacia e os processos que agem sobre o curso d’água. Como o fluxo concentrado em canais é muito mais rápido que nas vertentes ou no subsolo, a extensão da rede tem influência direta nas vazões efluentes. A extensão e densidade da rede de drenagem refletem controles topográficos, litológicos, pedológicos e de vegetação, além da influência antrópica.
- ❖ Comprimento da bacia e do canal principal: o caminho que a água percorre dentro da bacia, até atingir seu exutório determina o tempo de resposta da bacia. O comprimento total deste caminho pode ser representado pelo comprimento do canal principal, que pode ser relacionado com a área da bacia e com o comprimento total da rede de drenagem. Porém o comprimento do canal principal introduz duas outras considerações: i) dependência da forma da bacia; ii) falta de correspondência exata entre comprimento do vale e comprimento do canal.
- ❖ Declividade: a declividade da bacia tem influência direta na velocidade do fluxo. Ela é muitas vezes representada pela declividade média do seu curso d’água principal. Como geralmente há uma alternância entre baixos e trechos mais profundos, um levantamento detalhado do perfil longitudinal do canal é de fundamental importância para a correta determinação das diferentes declividades observadas em cada trecho do rio.

2.3. Importância do Estudo da Quantificação de Vazões

Abastecimento de água potável, abastecimento industrial, geração de energia hidrelétrica, irrigação, controle de cheias e secas, navegação fluvial, assimilação e diluição de efluentes sanitários e de efluentes industriais e preservação ecológica são alguns dos muitos usos e controles de recursos hídricos para os quais a avaliação de quantidade hídrica é de grande importância.

A disponibilidade de séries de dados hidrológicos confiáveis é fundamental para o desenvolvimento de projetos adequados de reservatórios, canais, diques, estações elevatórias, eclusas, vertedouros e de outras estruturas hidráulicas. Séries longas de registros de descargas líquidas passadas são de grande importância para a estimativa de períodos de recorrência e para o planejamento de ações mitigadoras de efeitos de cheias e secas. Segundo Mendonça (2001, p. 32), “o planejamento de medidas não estruturais de solução ou minimização de problemas relacionados com os recursos hídricos também depende da avaliação da quantidade de água”.

O estudo de vazões de enchente de pequenas bacias é muito importante devido ao dimensionamento de pontes e bueiros em estradas e também devido ao notório crescimento do aproveitamento dos recursos hídricos de pequenas bacias, tais como sistemas de abastecimento de água às pequenas comunidades, sistemas de irrigação, pequenas centrais hidrelétricas e outros.

A determinação da vazão máxima em uma pequena bacia, com precisão, é muito difícil. Genovez (2001, p. 33-34) diz que “a maior dificuldade está na ausência de dados observados de vazão e de chuvas intensas para a bacia em estudo. A vazão máxima é utilizada no dimensionamento de canais, alturas de pontes, bueiros e outros”.

2.4. Medições de Vazões

Existem vários métodos e maneiras para a obtenção e ou quantificação de dados hidrológicos referentes a vazões, sendo fundamental a sua escolha e a sua utilização de acordo com a precisão desejada das medidas, e as dimensões do curso d'água em questão.

As medidas de vazões, em rios e pequenos córregos, são obtidas através de uma estação hidrométrica de medição, que é instalada e operada com a finalidade de se obter as vazões em todos os níveis de lâmina d'água ao longo do tempo, em uma seção qualquer de um rio ou córrego.

Os métodos de medição de vazão podem ser classificados em três categorias, conforme a natureza da medida, assim descrito por Martins & Paiva (2001):

- De nível: são obtidos através de uma régua graduada ou por linígrafos ou linímetros;
- Não estrutural: são métodos baseados no uso de molinetes, flutuadores, compostos químicos, acústica entre outros;

- Estrutural: são métodos que fazem uso de estruturas de medição pré-calibradas, bastando-se determinar em geral uma medida de nível para obter-se a medida da vazão.

2.4.1. Precipitação

A precipitação é a principal entrada do sistema constituinte de uma bacia hidrográfica, sendo a partir dela obtidas as outras variáveis do sistema, a exemplo do escoamento superficial e da infiltração. Assim, a precipitação pode ser definida como toda a água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre, sendo a sua disponibilidade anual em uma região o fator determinante para quantificar a necessidade de irrigação e abastecimento de água. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas diferentes de precipitações, o que as diferencia é o estado em que a água se encontra (Bertoni & Tucci, 2001).

Genovez (2001, p. 34) diz que “os dados de chuva são fundamentais no estudo da determinação do escoamento superficial em pequenas bacias”.

A precipitação está diretamente ligada à duração e à intensidade com que ocorre, pois esses fatores são determinantes para que aconteça a saturação do solo e conseqüentemente o início do escoamento superficial. Períodos longos sem precipitação acarretam conseqüências negativas, como deficiência hídrica no solo, interrupção da vazão nos sistemas de drenagem e abaixamento do nível das barragens a limites críticos. Chuvas intensas e/ou vários dias consecutivos provocam inundações, erosão do solo e desmoronamentos de taludes, intensificando o transporte de sedimentos que assoreiam os leitos dos reservatórios d’água e dos rios (Buriol et al., 2006).

Exprime-se a quantidade de chuva pela altura de água caída e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável. De acordo com Villela & Mattos (1975), a precipitação é avaliada por meio de medidas executadas em pontos previamente escolhidos, utilizando aparelhos denominados pluviômetros ou pluviógrafos.

2.4.2. Escoamento Fluvial

Segundo Lencastre & Franco (1984), “a origem do escoamento superficial é a parte da precipitação caída que é maior do que as capacidades relativas aos processos de evaporação e

infiltração, sendo então que o volume de água excedente, em obediência às leis da gravidade, escoar-se à superfície do terreno até a linha de água mais próxima”.

O escoamento superficial tem origem principalmente nas precipitações, da parte da água da chuva que não é interceptada pela vegetação e outros obstáculos, de onde se evapora posteriormente.

Conforme Martins (1976, p. 36) “no início do escoamento superficial forma-se uma película laminar que aumenta de espessura, à medida que a precipitação prossegue, até atingir um estado de equilíbrio. As trajetórias descritas pela água no seu movimento são determinadas, pelas linhas de maior declive de terreno e são influenciadas pelos obstáculos existentes”.

O escoamento superficial começa algum tempo após o início da precipitação, devido à ação da interceptação pelos vegetais e obstáculos, à saturação do solo e à acumulação nas depressões do terreno.

Martins (1976) salienta que “comparando o escoamento subterrâneo e superficial em relação ao tempo de contribuição, no primeiro caso a variação da contribuição é lenta. Já no escoamento superficial, esta cresce até atingir um valor sensivelmente constante à medida que a precipitação prossegue. Cessada a precipitação, o escoamento superficial vai diminuindo até anular-se”.

Lencastre & Franco (1984, p. 249) ressaltam que “nos casos em que as chuvas forem particularmente intensas ou prolongadas, ou com ambas as características, o escoamento superficial poderá exceder a capacidade de vazão das linhas de água e transbordar do seu leito habitual, dando origem às cheias, com todos os seus inconvenientes”.

Villela & Mattos (1975) indicam os fatores que influenciam o escoamento superficial como sendo de natureza climática, relacionados com a precipitação ou de natureza fisiográfica ligados as características físicas da bacia. Podendo-se destacar dentro dos fatores climáticos: a intensidade, a duração da precipitação e a precipitação antecedente. Os fatores fisiográficos mais importantes são: a área da bacia, a forma, topografia da bacia, a permeabilidade e a capacidade de infiltração. Outros fatores importantes que influem no escoamento superficial são as obras hidráulicas construídas na bacia, como barragem, e o uso do solo como a urbanização, os métodos de plantio, o manejo do solo e práticas conservacionistas.

Lencastre & Franco (1984, p. 182) afirmam que “a cobertura vegetal é duplamente eficaz para aumentar a infiltração. Protege o terreno da compactação devido à chuva e favorece a atividade de escavação pelos insetos que se movimentam ao longo das raízes das plantas”.

Conforme Villela & Mattos (1975) e Martins (1976), as grandezas que caracterizam o escoamento superficial são: a vazão, volume escoado por unidade de tempo (m^3/s); o coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente de deflúvio, ou ainda coeficiente de “runoff”, razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado; o tempo de concentração, tempo em que a chuva que cai no ponto mais distante da seção considerada de uma bacia leva para atingir esta seção; nível de água, altura atingida pela água na seção em relação a uma determinada referência e o tempo de recorrência ou período de retorno, período de tempo médio em que um determinado evento (neste caso vazão) é superado ou igualado pelo menos uma vez.

Lencastre & Franco, (1984, p. 250) destacam que “ao contrário de todas as outras componentes do ciclo hidrológico, que só podem ser quantificadas por amostragem, o escoamento de superfície é a única dessas componentes que pode ser medida em sua totalidade”.

2.5. Modelagem Hidrológica

Segundo Tucci (2005), o modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. Utilizado para antecipação de eventos de modo a permitir que medidas preventivas sejam tomadas. No entanto, nenhuma metodologia poderá aumentar as informações fornecidas pelos dados e não se deve deixar de usá-los na aferição dos parâmetros, na tentativa de reduzir as incertezas dos mesmos na estimativa das variáveis hidrológicas.

Para Spruill et al. (2000), o modelo hidrológico é uma ferramenta gerada para avaliar os processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais.

Tucci (2005) salienta que um modelo de simulação, de um modo geral, pode ser definido como a representação de um sistema através de equações matemáticas, ou seja, a representação do comportamento de uma estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado intervalo de tempo inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação. A estrutura dos modelos hidrológicos é baseada nos seguintes elementos: discretização da bacia hidrográfica (dependente do modelo), variáveis de entrada (chuva, evapotranspiração), estrutura básica da integração dos processos (bacia, canal, encosta), aquisição de dados físicos das bacias e determinação dos parâmetros.

Paiva e Paiva (2001) destacam a importância do monitoramento hidrológico para a adequada caracterização quali-quantitativa dos recursos hídricos, onde as séries de dados hidráulicos e hidrológicos confiáveis são imprescindíveis para a utilização e aplicação de modelos.

Através do monitoramento, obtêm-se os dados necessários para a modelagem matemática. A modelagem matemática consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação de sistema real. O monitoramento e a modelagem são métodos científicos mutuamente complementares, pois o modelo é calibrado a partir dos dados obtidos no monitoramento, dessa forma o sucesso do modelo está ligado à qualidade do monitoramento. A modelagem possibilita a criação de diferentes cenários reais ou imaginários, de forma rápida e com baixo custo, pois geralmente o custo da investigação experimental é superior ao da execução de um programa computacional (PESSOA et al., 1997; KOBAYAMA e MANFROI, 1999; MACHADO, 2002 apud LOPES, 2008, p. 26). Entretanto, a vantagem do baixo custo não exclui a necessidade da pesquisa de campo, mas auxilia na realização de experimentos que trarão maior quantidade de informações novas e relevantes à pesquisa e como consequência maior qualidade à modelagem (PESSOA et al., 1997 apud MACHADO, 2002, p. 12).

De acordo com Tucci (1987), três condições são fundamentais para determinar a utilização de modelos matemáticos do tipo hidrológico: objetivos do estudo, dados disponíveis e metodologia proposta. O objetivo do estudo estabelece o nível de precisão desejado para a representação dos fenômenos que ocorrem na bacia hidrográfica. Entretanto, esta precisão depende da quantidade e qualidade dos dados disponíveis para aferir a metodologia, assim o modelo hidrológico é escolhido de acordo com o objetivo do estudo, que definirá o nível de precisão desejado, estando implícitas as questões relacionadas à disponibilidade dos dados.

Campana (1997) diz que a pesquisa em hidrologia tem se voltado principalmente para estudos envolvendo a compreensão dos mecanismos físicos que regem os fenômenos, e, neste aspecto, não só interessa a entrada (precipitação) e a saída (vazão líquida e sólida, e qualidade), mas também características dos fenômenos controladores do processo.

Braga et al. (2003) aponta algumas desvantagens na aplicação de modelos de simulação, como: dificuldade de encontrar dados disponíveis e representativos para o desenvolvimento e calibração do modelo; emprego de relações simplificadas entre as variáveis intervenientes, em função da complexidade dos fenômenos representados, ou pelo

pouco conhecimento destes, ou, ainda por limitações computacionais; difícil incorporação de fatores, como os sociais, por exemplo; e ainda, a possibilidade de induzir o processo de decisão.

No Brasil o uso de modelos matemáticos e simuladores na pesquisa ambiental e agropecuária ainda é tímido, porém crescente, o que não acontece em outros países onde essa prática é comum. Às dificuldades do uso de modelos matemáticos, soma-se a ausência de informações qualitativas e quantitativas, geralmente devido à falta de publicação de dados detalhados de questões variadas referentes ao ambiente estudado (PESSOA et al., 1997 apud MACHADO, 2002, p. 14).

Thomas et al. (1998) destaca que existem inúmeros modelos, porém é necessário avaliá-los e compreendê-los para se fazer a aplicação correta conforme a necessidade de estudantes, pesquisadores, consultores, organizações de planejamento e grupos ambientais, embora os modelos em geral não atendam as expectativas destes profissionais, porque são elaborados para situações em particular.

Conforme Raudkivi (1979), os dados medidos não são homogêneos, são passíveis de erros diversos e limitações, com a sua utilidade para prever um comportamento futuro limitada, então se utiliza a modelagem hidrológica para melhorar o entendimento da bacia hidrográfica.

Os principais focos dos modelos são a estimativa da quantidade de água que escoar em uma bacia e sua qualidade.

Com base em Tucci (2005), os modelos hidrológicos são agrupados de acordo com suas principais características da seguinte forma:

- ✓ Modelos discretos ou contínuos: contínuos quando os fenômenos são contínuos no tempo; enquanto que o sistema é discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos determinados.
- ✓ Modelos concentrados ou distribuídos: concentrados quando não leva em conta a variabilidade espacial, os parâmetros variam somente em função do tempo e são representados por equações diferenciais ordinárias com uma variável independente, que em geral é o tempo; distribuídos são aqueles que dependem do espaço e/ou tempo, utilizando-se para representá-los equações diferenciais parciais com mais de uma variável independente.
- ✓ Modelos estocásticos ou determinísticos: determinísticos quando, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída; estocásticos quando o

relacionamento entre entrada e saída é estatístico. Sendo que as condições iniciais devem ser exatamente as mesmas para certos sistemas.

- ✓ Modelos conceituais ou empíricos: conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos; empíricos são os que ajustam os dados calculados e os observados através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos, são também conhecidos como do tipo “caixa preta”. O modelo SWAT está incluído neste grupo.

2.6. Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Geoprocessamento pode ser entendido como o conjunto de tecnologias de coleta e tratamento de informações espaciais e de desenvolvimento e uso de sistemas que as utilizam (RODRIGUES, 1990 apud MACHADO, 2002, p. 14).

Segundo Rocha (2000), o Sistema de Informações Geográficas (SIG) é a ferramenta capaz de adquirir, armazenar, tratar, integrar, processar, recuperar, transformar, manipular, modelar, atualizar, analisar e exibir informações digitais georreferenciadas, topologicamente estruturadas que representam o relacionamento entre as entidades, associado ou não a um banco de dados alfanuméricos. Este banco de dados pode ser obtido por sensoriamento remoto, mapas, cadastros, entre outros.

Minoti (2006) descreve que a estrutura raster, indicada para a realização de operações algébricas, apóia-se na organização celular de dados espaciais, ou seja, os valores existentes dos parâmetros de interesse (altitude, temperatura, usos do solo, etc.) estão locados para cada célula (pixel) de composição de um mapa. A união das estruturas raster e vector é essencial para a realização de trabalhos de análise e planejamento dos recursos hídricos.

Conforme Zanetti (2007), com técnicas de geoprocessamento manipulam-se as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões, de forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos e tempo, agregando dados de diferentes fontes (imagens de satélite, fotografias aéreas, mapas topográficos, mapas de solos, hidrografia, etc.) e em diferentes escalas. É uma tecnologia desenvolvida para lidar com informações espaciais e possui diversas aplicações ambientais, sociais e econômicas (GRIGG, 1996 apud MACHADO, 2002, p. 15).

O Sistema de Informações Geográficas auxilia na aplicação dos modelos, como por exemplo: através do modelo digital do terreno obtêm-se as características topográficas da bacia; com a análise das imagens obtidas por sensoriamento remoto obtêm-se a localização e

disposição espacial das características da bacia (tipo e uso do solo); a superposição de diferentes mapas delimita áreas com características homogêneas dentro da bacia hidrográfica. Ou seja, “o SIG combina informações topográficas, climáticas, tipo e uso do solo para pequenas áreas dentro de uma bacia hidrográfica, onde é possível visualizar cenários passados, atuais, e simular cenários futuros” (GRIGG, 1996 apud MACHADO, 2002, p. 15).

O SIG permite que a avaliação ambiental de uma região ocorra com maior agilidade e eficiência, possibilitando a identificação de suas potencialidades de uso (inclusive o não uso), ocupação, vulnerabilidades e desempenho futuro estimado, permitindo a otimização de decisões ligadas à preservação, conservação e ecodesenvolvimento (MACEDO, 1991 apud MINOTI, 2006, p. 9).

De acordo com Rocha (2000), o Modelo Digital do Terreno (MDT) é a representação matemática de uma superfície, através das coordenadas X, Y e Z, onde se pode representar a altimetria de uma região, ou qualquer outra característica representada de forma contínua como, por exemplo, temperatura, precipitação e poluição.

Mendes (1996 apud ZANETTI, 2007, p. 34) mostrou que, conceitualmente, a união entre o geoprocessamento e os modelos hidrológicos se dá através dos cinco estágios citados abaixo, sendo que apenas o quarto estágio representa o modelo hidrológico e os restantes podem ser realizados em programas de SIG: (i) obtenção de dados (dados de campo e digitais); (ii) processamento e análise de dados de entrada; (iii) operações no ambiente de geoprocessamento; (iv) simulação hidrológica; e (v) simulação visual dos dados.

A integração do SIG com os modelos hidrológicos e a sua aplicação em bacias hidrográficas torna possível diversas operações, como por exemplo: projeto, calibração, simulação e comparação entre modelos. De modo que, o uso do SIG permite subdividir a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas (CALJURI et al., 1998 apud MACHADO, 2002, p. 16). Minoti (2006) salienta que o grande volume de dados requeridos para análise e avaliação de problemas hidrológicos próximos à superfície, em escala regional, tem ocasionado um crescimento da demanda de base de dados computadorizada.

Tim & Jolly (1994 apud MACHADO, 2002, p. 17) diz que “o desenvolvimento de interfaces entre SIG e modelos é uma área ativa de pesquisa, particularmente em questões de proteção da qualidade de água, planejamento de uso da terra e manejo de recursos naturais”.

Consoante com as idéias desenvolvidas por Mendes (1998 apud MACHADO, 2002, p. 18) sobre a utilização de modelos hidrológicos e SIG, o primeiro lida com fenômenos contínuos e dinâmicos, enquanto que o segundo trata apenas com dados estáticos e discretos. O SIG utiliza-se de pontos, linhas, polígonos, grades, redes de triângulos irregulares, etc. e no

campo conceitual, a análise de fenômenos é feita através da manipulação e interpretação de dados geográficos. Na Hidrologia, os sistemas a serem representados espacialmente são bacias, aquíferos, rios, canais, etc. e esta análise é feita através da simulação do movimento da água e de seus constituintes, através de equações que representam leis físicas. É importante a compreensão deste problema e das suposições e limitações da representação discreta da “realidade” manipulada através do SIG e o uso destes dados em modelos. Com base em Vieux (2004), os modelos são reproduções imperfeitas do movimento da água em um sistema natural, desta forma precisam ser calibrados com os dados observados. Veith et al. (2010) salienta que a calibração minimiza erros entre a saída do modelo e os dados observados, embora seja um processo difícil devido ao grande número de parâmetros não mensuráveis que precisam ser estimados.

2.7. SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) foi desenvolvido por Jeff Arnold, em 1996, do US Department of Agriculture, Agricultural Research Service no Grassland, Soil and Water Research Laboratory, em Temple no Texas - EUA, com o objetivo de prever o impacto de práticas de manejo do solo em relação à água, produção de sedimentos e agroquímicos em bacias hidrográficas complexas não instrumentadas com diversas combinações - usos - coberturas do solo e condições de manejo em longos períodos de tempo em escala de bacia hidrográfica (NEITSCH et al., 2009).

O SWAT, conforme Neitsch et al. (2002), se originou do modelo SWRRB (Simulator of Water Resources in Rural Basins), que por sua vez teve origem do modelo CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems). Também contribuíram significativamente no desenvolvimento do SWAT os modelos GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) e EPIC (Erosio-Productivity Impact Calculator). A principal limitação do modelo SWRRB em relação ao SWAT está relacionada ao tamanho da bacia e número de sub-bacias. No caso do SWRRB o número de sub-bacias limite é de 10. O SWAT foi criado na década de 90, tendo sofrido sucessivas modificações (PAIVA e PAIVA, 2006a, p. 3).

O modelo tem sido continuamente aprimorado, sendo a versão 2009 utilizada neste trabalho.

De acordo com Paiva e Paiva (2006a), o modelo permite utilizar a infiltração de Green & Ampt, geração de dados climáticos, evapotranspiração calculada ou medida, possibilita a utilização de um número ilimitado de reservatórios, utilização do método de Muskingum, etc.

O modelo SWAT se associa ao software de geoprocessamento ArcGIS, através da interface ArcSWAT, onde atividades de pré-processamento permitem obter características das

sub-bacias através de mapas de elevação, uso e tipo de solo; além da visualização de resultados nas atividades de pós-processamento.

O SWAT é do tipo distribuído, e a bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias de modo a refletir as diferenças de tipo de cobertura vegetal, topografia e uso do solo, sendo possível a subdivisão de centenas a milhares de células, cada célula representando uma sub-bacia. O modelo é dividido em quatro componentes: produção de água, produção de sedimento, propagação no canal e propagação no reservatório. É utilizada a metodologia do Soil Conservation Service (SCS) para os parâmetros hidrológicos e a MUSLE para a previsão da produção de sedimentos. A propagação do sedimento do canal consiste de duas componentes operadas simultaneamente: deposição e degradação (Oliveira, 1999).

Segundo Moro (2005), o modelo opera, normalmente, em intervalo de tempo diário, porém é possível uma resolução sub-diária e também a simulação contínua de vários anos.

Machado (2002) destaca que o SWAT é um modelo matemático, onde diferentes processos físicos podem ser simulados na bacia hidrográfica, com a finalidade de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água. O modelo é baseado em características físicas da bacia, podendo ser usado para modelar bacias sem monitoramento, usa dados de entrada geralmente disponíveis, é computacionalmente eficiente para operar sobre médias e grandes bacias (> 1.000 km²) e é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos (> 100 anos) de forma a computar os efeitos das alterações no uso do solo.

O modelo SWAT é baseado em uma estrutura de comandos para propagar o escoamento, sedimentos e agroquímicos através da bacia. Os maiores componentes do modelo incluem hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (MORO, 2005, p. 19).

Conforme Machado (2002), o sistema hidrológico do modelo inclui sub-rotinas de escoamento superficial, reservatório subsuperficial, reservatório subterrâneo – aquífero raso e reservatório subterrâneo – aquífero profundo. A contribuição destes reservatórios para o escoamento superficial provém do escoamento lateral a partir do perfil do solo e do escoamento de retorno do aquífero raso. O volume que percola do reservatório subsuperficial, através do perfil do solo, representa a recarga do aquífero raso. A água que percola para o aquífero profundo não retorna para o sistema.

Paiva e Paiva (2006a, p. 3) salientam que a bacia ao ser subdividida em várias sub-bacias dá uma maior representatividade dos processos simulados, sendo que os dados necessários se agrupam nas seguintes categorias: clima; HRU (Unidades de Resposta Hidrológica); armazenamento; água subterrânea e canal principal.

Arnold et al. (1998 apud MORO, 2005, p. 19) afirma que as Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Units – HRU) são partes da sub-bacia que possuem uma única combinação de uso terra/solo/manejo, onde uma ou mais combinações de uso da terra/solo podem ser criadas para cada sub-bacia. A subdivisão da bacia, em áreas com combinações únicas, faz com que o modelo apresente diferenças na evapotranspiração e outras condições hidrológicas para diferentes usos e solos. Para cada HRU o escoamento é calculado e propagado para se obter o escoamento total da sub-bacia, e como consequência aumentar a precisão das predições e melhorar a descrição física do balanço de água na bacia. De acordo com Meira Neto et al. (2011), através da precipitação diária, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e o escoamento de retorno do aquífero raso se obtém a produção de água em cada HRU.

Segundo Minoti (2006), o balanço hídrico é a força que conduz todos os processos simulados pelo SWAT.

A simulação hidrológica na bacia é dividida em duas fases. A primeira fase consiste na simulação na sub-bacia, controlando a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas que chegam ao canal principal da sub-bacia. A segunda fase é a da simulação do movimento de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas no canal principal até a seção de saída da bacia (Paiva e Paiva, 2006a, p. 3).

As variáveis climáticas requeridas pelo SWAT são dados de precipitação em mm, temperaturas do ar máxima e mínima em °C, radiação solar em MJ/m²/dia, umidade relativa do ar em % e velocidade do vento em m/s, sendo que estes valores podem ser dados observados ou valores gerados pelo modelo para a simulação.

Minoti (2006, p. 25) destaca que “os dados diários de precipitação são requeridos quando o método do número da curva (SCS – “curve number”) é escolhido para modelar o escoamento de superfície”.

Os dados diários de umidade relativa do ar são usados para estimar a evapotranspiração potencial que pode ser calculada pelo modelo através dos seguintes métodos: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith.

Paiva e Paiva (2006a) descrevem os processos hidrológicos simulados pelo modelo: interceptação, infiltração, redistribuição da água no solo, evapotranspiração, escoamentos sub-superficial e superficial, armazenamento, escoamento em canais principais e tributários e vazão de base. Para a interceptação é necessária a máxima altura de água do reservatório, que é avaliada em conjunto com o índice de área foliar e o ciclo de crescimento da planta. Quando a capacidade de campo de uma camada é excedida e a camada inferior não está saturada ocorre a percolação. A evaporação real do solo é calculada através de funções exponenciais da

profundidade do solo e quantidade de água, já a transpiração das plantas é obtida como uma função linear da evapotranspiração potencial e índice de área foliar. O escoamento sub-superficial, no perfil de solo entre 0 e 2 m, é estimado pelo modelo de armazenamento, obtido da variação da condutividade, declividade e conteúdo de água no solo. O volume de escoamento superficial é obtido através de uma modificação do método SCS (Soil Conservation Service) ou método de infiltração de Green & Ampt. No método do SCS, o CN varia não linearmente com a umidade do solo. No método de Green & Ampt são utilizados dados de precipitação discretizados no dia. A vazão de pico é calculada através de uma modificação do método racional, que utiliza uma proporção da chuva diária, obtida através de técnicas estocásticas, com duração igual ao tempo de concentração, que cai na sub-bacia. O tempo de concentração é obtido pela fórmula de Manning, considerando escoamento superficial e no canal. A área superficial abaixo da capacidade do reservatório é calculada como uma função não linear do armazenamento. O tempo de concentração das sub-bacias é estimado através do escoamento nos canais tributários e principal. O SWAT utiliza um modelo de crescimento de plantas, que diferencia plantas perenes e anuais; e que é usado para analisar a remoção de água e nutrientes, transpiração e produção de biomassa.

Os processos hidrológicos simulados no modelo SWAT podem ser resumidos conforme o fluxograma da Figura 1.

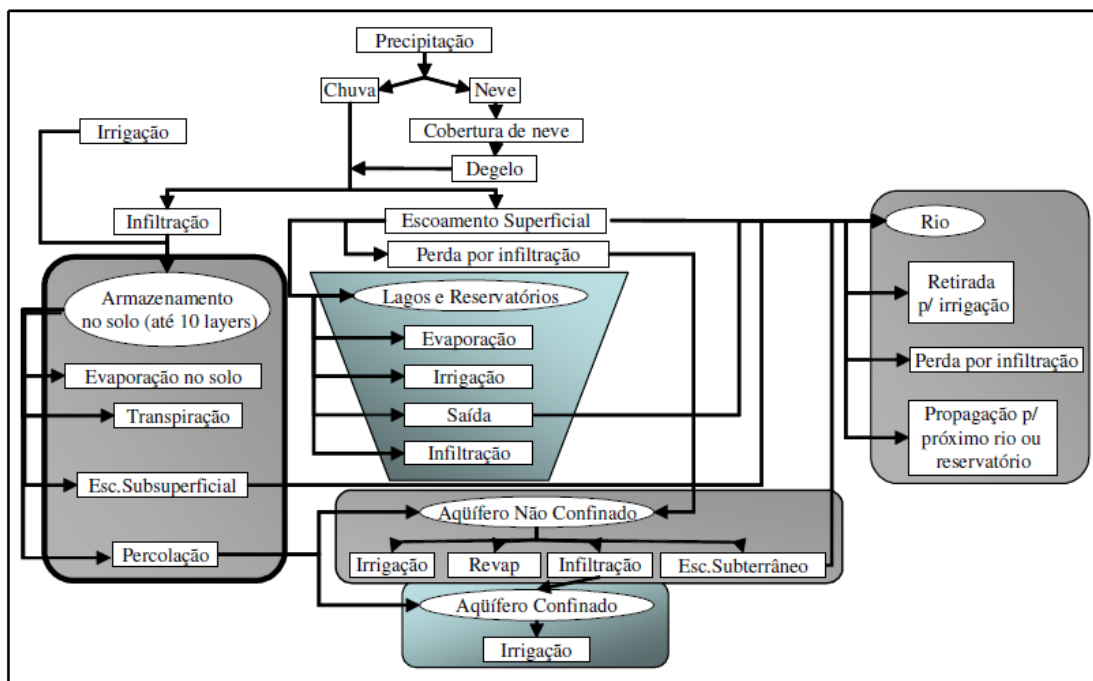


FIGURA 1: Fluxograma dos processos hidrológicos simulados pelo modelo SWAT (Fonte: Paiva e Paiva, 2006b, modificado de King et al. (1996)).

Oliveira (1999) diz que o modelo SWAT tem algumas limitações: comportamento logarítmico do parâmetro Curva Número (CN) não permite ao modelo responder as alterações da cobertura do solo quando a bacia hidrográfica não apresenta uma grande impermeabilização; o modelo utiliza a MUSLE para o cálculo da produção de sedimento na bacia, entretanto sabe-se que esta não é uma equação de erosão e sim de perda de solo que se processa na sua maior parte como erosão laminar, não considerando outros tipos de erosão como a erosão em voçorocas e barrancos; o valor do fator de uso e manejo do solo (C) adotado para mata de 0,001 é um valor considerado alto para matas tropicais, o modelo hidrológico SWAT apresenta uma limitação de três casas decimais, na sua entrada de dados; as equações utilizadas na propagação do sedimento no canal são relativamente simples, assumindo que as dimensões do canal são constantes ao longo do tempo. Apesar das limitações levantadas, o modelo hidrológico SWAT apresenta vantagens tais como: representa quase todos os processos envolvidos na transformação de chuva em vazão; permite a divisão da bacia hidrográfica segundo critérios de distribuição espacial das chuvas e características físicas; os parâmetros podem ser obtidos a partir de estudos anteriores.

No Brasil, como em outros países, há diversos estudos hidrológicos sobre o modelo SWAT, Machado (2002) aplicou o modelo SWAT para simular o escoamento e a produção de sedimentos produzidos pela microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, afluente do rio Piracicaba/SP, na sequência desta linha de pesquisa Moro (2005) aplicou o modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins com a simulação de cenários alternativos – Piracicaba/SP, Baldissera (2005) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT para simulação de vazões líquidas mensais na bacia do Rio Cuiabá, Paiva e Paiva (2006a) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT na Bacia Menino Deus I, sub-bacia do Rio Vacacaí-Mirim, Santa Maria/RS, Lubitz (2009) avaliou a aplicação do modelo SWAT na bacia experimental do Ribeirão Concórdia – Lontras/SC, Garbossa et al. (2010) avaliou o potencial de uso do modelo SWAT em gerar cenários representativos sobre disponibilidade hídrica e produção de sedimentos vinculados a legislação florestal na bacia de Lajeado dos Fragosos/SC, Souza (2011) avaliou a estimativa de vazões mínimas e a regionalização de vazões na bacia do Altíssimo Rio Negro - Curitiba/PR, Perazzoli (2012) aplicou o modelo hidrológico SWAT para analisar os impactos gerados pelas mudanças climáticas e uso do solo, no regime das vazões e produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia - Lontras/SC, Salles (2012) realizou simulações da vazão na bacia hidrográfica do Ribeirão Pípiripau, entre outros trabalhos disponíveis na literatura.

2.7.1. Estrutura do Modelo SWAT

A descrição da estrutura do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) consta na sua documentação teórica, onde se verifica que o modelo está dividido em quatro componentes: (i) produção de água, (ii) produção de sedimento, (iii) propagação no canal e (iv) propagação no reservatório.

2.7.1.1. Produção de Água

O sistema hidrológico simulado pelo SWAT é composto de quatro volumes de controle: (i) reservatório superficial, (ii) reservatório subsuperficial, (iii) reservatório subterrâneo - aquífero raso ou livre e (iv) reservatório subterrâneo - aquífero profundo. As contribuições destes reservatórios para o escoamento superficial provêm do escoamento lateral a partir do perfil de solo e do escoamento de retorno do aquífero raso. O volume que percola do reservatório subsuperficial através do perfil de solo, representa a recarga do aquífero raso. A água que percola para o aquífero profundo, não retorna para o sistema.

No modelo SWAT a determinação da produção de água superficial da bacia hidrográfica é fundamentada pela equação do balanço hídrico (NEITSCH et al., 2009):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - Q_{ri}) \quad (1)$$

Sendo: SW_t = umidade final do solo (mm); SW_0 = umidade inicial do solo (mm); t = tempo (dias); R = precipitação diária (mm); Q = escoamento superficial (mm); ET = evapotranspiração diária (mm); P = percolação (mm); Q_r = escoamento de retorno (mm); i = passo de tempo (dia).

Abaixo é apresentada a formulação matemática e a metodologia de cálculo para cada uma destas variáveis.

2.7.1.1.1. Escoamento Superficial (Q)

O escoamento superficial é calculado através da equação modificada do Método da Curva Número (CN), do Soil Conservation Service - SCS (USDA-SCS, 1972), onde se considera na formulação a quantidade de água interceptada pelas plantas ou através do método de infiltração de Green e Ampt, onde são utilizados dados subdiários de precipitação.

A equação para cálculo do escoamento superficial pelo Método da Curva Número (CN) do SCS é:

$$Q = \left[\frac{(R - 0,2.s)^2}{R + 0,8.s} \right], R > 0,2.s \quad (2)$$

$$Q = 0, R \leq 0,2.s \quad (3)$$

Sendo: Q = escoamento superficial diário (mm); R = precipitação diária (mm); s = parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro de retenção varia conforme: (i) a sub-bacia, em função do solo, uso do solo e declividade e (ii) com o tempo, em função das alterações de umidade do solo. Este parâmetro (s) está relacionado com a curva número (CN) do SCS pela equação:

$$s = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

Sendo: CN = número da curva para um dia.

A curva número (CN) do SCS é função da permeabilidade e uso do solo e umidade do solo anterior à precipitação, determinado conforme o tipo hidrológico do solo. A escala da CN não é linear, variando entre 1 e 100, sendo que os valores extremos correspondem, respectivamente, a uma cobertura permeável até uma cobertura impermeável.

Para os valores de CN se considera três condições:

- ✓ CN₁: corresponde à curva número para a condição I de umidade, situação em que os solos estão secos;
- ✓ CN₂: corresponde à curva número para a condição II de umidade, ou seja, situação média em que os solos apresentam a umidade da capacidade de campo;
- ✓ CN₃: corresponde à curva número para a condição III de umidade, situação em que os solos estão saturados.

Para computar os valores corrigidos de CN₁ e CN₃, estes foram relacionados com o CN₂ através das seguintes equações:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{\{(100 - CN_2) + \exp[2,533 - 0,0636 \cdot (100 - CN_2)]\}} \quad (5)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0,00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad (6)$$

2.7.1.1.2. Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração abrange todos os processos responsáveis pela transformação da água da superfície da Terra em vapor e é obtida pela soma da evaporação do solo e a transpiração das plantas, ambas determinadas em função da evapotranspiração potencial.

a) Evaporação Potencial (E_o)

O modelo SWAT disponibiliza três métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial: Penman & Monteith (1965), Priestley & Taylor (1972) e Hargreaves & Samani (1985). O método de Penman & Monteith requer dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. O método de Hargreaves & Samani utiliza dados de temperatura do ar. O método de Priestley & Taylor faz uso de dados de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa.

b) Evaporação do Solo (E_s)

A evaporação da água no solo é simulada considerando a cobertura no solo, de acordo com a seguinte equação:

$$E_s = [(E_o)(EA)] \quad (7)$$

Sendo: E_s = evaporação no solo (mm/dia); E_o = evaporação potencial (mm); EA = índice de cobertura do solo.

O índice de cobertura do solo é função da biomassa sobre o terreno e o resíduo de cultura, sendo calculado através das informações de cobertura vegetal da bacia hidrográfica.

c) Transpiração das Plantas (E_p)

A transpiração das plantas é computada a partir das seguintes equações:

$$E_p = \left[\frac{(E_o)(LAI)}{3,0} \right], 0 \leq LAI < 3 \quad (8)$$

$$E_p = E_o, LAI \geq 3 \quad (9)$$

Sendo: E_p = transpiração das plantas (mm/dia); E_o = evaporação potencial (mm); LAI = índice de área foliar.

O LAI é simulado como uma função das temperaturas máximas diárias e da cobertura do solo.

2.7.1.1.3. Percolação (P)

A percolação do modelo SWAT usa uma técnica de propagação do armazenamento, combinado com um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo. Após a percolação da água abaixo da zona de raiz (*root zone*), este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado.

Assim, a percolação que ocorre da camada superior para a inferior, pode ser obtida pela seguinte equação:

$$P_{perc} = SW_{ly,excess} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right] \quad (10)$$

Sendo: P_{perc} = quantidade de água que percola em um dia (mm); $SW_{ly,excess}$ = volume drenável de água na camada de solo em um dia qualquer (mm); Δt = intervalo de tempo (h); TT_{perc} = tempo de propagação para a percolação (h).

O volume de água disponível para percolação $SW_{ly,excess}$ na camada de solo em um dia qualquer é obtido por:

$$SW_{ly,excess} = (SW_{ly} - FC_i), \text{ se } SW_{ly} > FC_i \quad (11)$$

$$SW_{ly,excess} = 0, \text{ se } SW_{ly} \leq FC_i \quad (12)$$

Sendo: SW_{ly} = conteúdo de água na camada do solo em um dia qualquer (mm); FC_i = conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm).

O tempo de propagação, TT_{perc} , é computado para cada camada de solo i , através da equação linear de armazenagem:

$$TT_{perc} = \left[\frac{(SAT_i - FC_i)}{K_{sat}} \right] \quad (13)$$

Sendo: TT_{perc} = tempo para percolação (h); K_{sat} = condutividade hidráulica saturada (mm/h); SAT_i = quantidade de água na camada de solo quando completamente saturado (mm); FC_i = conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm).

A água contida no solo no ponto de murchamento e a capacidade de campo são definidas pelo modelo como função da densidade do solo de cada sub-bacia.

2.7.1.1.4. Taxa de Escoamento de Pico

A taxa de escoamento de pico é a taxa de escoamento superficial máximo que ocorre em um evento de precipitação, sendo um indicador do poder erosivo da chuva.

O modelo SWAT calcula a taxa de escoamento de pico através do Método Racional Modificado, que considera que uma chuva de intensidade i começa no tempo $t = 0$ e continua indefinidamente. A taxa de escoamento aumenta até o tempo de concentração $t = t_{conc}$, onde a vazão recebe a contribuição de toda a área da sub-bacia. A fórmula racional é calculada pela equação abaixo:

$$q_p = \left[\frac{(C.i.A)}{3,6} \right] \quad (14)$$

Sendo: q_p = taxa de escoamento superficial (m^3/s); C = coeficiente de escoamento; i = intensidade da chuva (mm/h); A = área da sub-bacia (Km^2); $3,6$ = fator de conversão de unidade.

O Método Racional Modificado é dado por:

$$q_p = \left[\frac{(a_{tc} \cdot Q \cdot A)}{(3,6 \cdot t_{conc})} \right] \quad (15)$$

Sendo: q_p = taxa de escoamento superficial (m^3/s); a_{tc} = fração do escoamento diário que ocorre durante o tempo de concentração; Q = escoamento superficial (mm); A = área da sub-bacia (Km^2); t_{conc} = tempo de concentração (h); $3,6$ = fator de conversão de unidade.

2.7.1.1.5. Escoamento Lateral (q_{lat})

O escoamento lateral é importante em áreas com solos de alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais e com camadas impermeáveis ou semi-impermeáveis. O escoamento lateral de saída é representado por:

$$q_{lat} = 24 \cdot H_0 \cdot v_{lat} \quad (16)$$

Sendo: q_{lat} = escoamento lateral de saída (mm/dia); H_0 = espessura da camada saturada do comprimento de rampa (mm/mm); v_{lat} = velocidade do escoamento de saída (mm/h).

A projeção da espessura da camada saturada do comprimento de rampa, H_0 é:

$$H_0 = \left[\frac{(2 \cdot SW_{ly,excess})}{(1000 \cdot \theta_d \cdot \lambda)} \right] \quad (17)$$

Sendo: H_0 = espessura da camada saturada do comprimento de rampa (mm/mm); $SW_{ly,excess}$ = volume drenável na zona saturada (mm); θ_d = porosidade drenável do solo; λ = comprimento de rampa (m).

A velocidade de saída é estimada por:

$$v_{lat} = [K_{sat} \cdot \text{sen}(\alpha)] \quad (18)$$

Sendo: v_{lat} = velocidade do escoamento de saída (mm/h); K_{sat} = condutividade hidráulica saturada (m/h); α = ângulo de inclinação da encosta; $\text{sen}(\alpha)$ = declividade da encosta (m/m).

2.7.1.1.6. Tempo de Concentração

O tempo de concentração na bacia é estimado pela soma do tempo que a água flui na superfície a partir do ponto mais distante na sub-bacia até atingir um canal, mais o tempo de percurso no canal até atingir a saída da sub-bacia.

$$t_c = t_{cc} + t_{cs} \quad (19)$$

Sendo: t_c = tempo de concentração na sub-bacia (h); t_{cc} = tempo de concentração para o escoamento no canal (h); t_{cs} = tempo de concentração para o escoamento na superfície (h).

O tempo de concentração no canal (t_{cc}) é calculado pela equação abaixo:

$$t_{cc} = \left[\frac{(0,62 \cdot L_c \cdot n^{0,75})}{(A^{0,125} \cdot \text{slp}_c^{0,375})} \right] \quad (20)$$

Sendo: t_{cc} = tempo de concentração no canal (h); L_c = comprimento do canal a partir do ponto mais distante da sub-bacia até a saída (Km); n = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (adimensional); A = área da sub-bacia (Km²); slp_c = declividade do canal (m/m).

O tempo de concentração na superfície (t_{cs}) é obtido pela equação:

$$t_{cs} = \left[\frac{(L_{slp}^{0,6} \cdot n^{0,6})}{(18 \cdot \text{slp}^{0,3})} \right] \quad (21)$$

Sendo: t_{cs} = tempo de concentração na superfície (h); L_{slp} = comprimento de rampa (m); n = coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional); slp = declividade média na sub-bacia (m/m).

2.7.1.1.7. Retardo do Escoamento Superficial

O modelo SWAT tem um recurso de armazenamento para o volume do escoamento superficial que não chega ao canal principal no mesmo dia em que é gerado.

A quantidade de escoamento superficial liberado para o canal principal é obtido através da equação:

$$Q = (Q' + Q_{stor,i-1}) \left[1 - \exp\left(\frac{-surlag}{t_c}\right) \right] \quad (22)$$

Sendo: Q = quantidade de escoamento superficial liberada para o canal principal em um dia qualquer (mm); Q' = quantidade de escoamento superficial gerada em uma bacia em um dia qualquer (mm); $Q_{stor,i-1}$ = escoamento superficial armazenado ou atrasado do dia anterior (mm); $surlag$ = atraso do escoamento superficial; t_c = tempo de concentração para a bacia (h).

2.7.1.1.8. Armazenamento no Dossel

O armazenamento no dossel influi no escoamento superficial, na infiltração e na evapotranspiração. O modelo SWAT calcula a quantidade máxima de água que pode ficar retida nas copas das plantas em função do índice de área foliar, conforme a equação:

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \left(\frac{LAI}{LAI_{mx}} \right) \quad (23)$$

Sendo: can_{day} = quantidade máxima de água que pode ser retida nas copas em um dia qualquer (mm); can_{mx} = quantidade máxima de água que pode ser retida nas copas quando o dossel está totalmente desenvolvido (mm); LAI = índice de área foliar para um dia qualquer; LAI_{mx} = índice máximo de área foliar para a planta.

2.7.1.1.9. Água no Solo

A água presente no solo pode variar de zero quando o solo é secado em estufa, até um valor máximo que ocorre quando o solo está completamente saturado. Na interação entre planta e solo, há dois teores de umidade que são importantes, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. A capacidade de campo é a quantidade de água encontrada em um solo quando o mesmo, na condição saturada, foi drenado por aproximadamente dois dias. O ponto de murcha permanente é a quantidade de água encontrada no solo, na qual as plantas murcham e não conseguem recuperar-se, devido à dificuldade de extrair a água, mesmo em

um ambiente úmido. A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente estão relacionados com a tensão a qual a água é submetida no solo. A capacidade de campo é a quantidade de água retida no solo na tensão de 0,033 MPa e o ponto de murcha permanente é a quantidade de água retida no solo com uma tensão de 1,5 MPa.

A quantidade de água existente entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente é denominada de capacidade de água disponível, ou seja, a água disponível para a extração das plantas, dada pela equação:

$$AWC = FC - WP \quad (24)$$

Sendo: AWC = quantidade de água disponível para as plantas (mm); FC = conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm); WP = quantidade de água no ponto de murcha permanente (mm).

2.7.1.2. Água Subterrânea

O modelo SWAT considera o aquífero raso e o aquífero profundo para cada bacia. O aquífero raso é o aquífero não confinado que contribui para a vazão no canal principal ou dentro da bacia. O aquífero profundo é o aquífero confinado que contribui para a vazão fora da bacia (ARNOLD et al., 1993, apud NEITSCH et al., 2009).

O balanço hídrico no aquífero raso é definido por:

$$V_{sa_i} = (V_{sa_{i-1}} + Rc - revap - Q_r - perc_{gw} - w_{pump,sh}) \quad (25)$$

Sendo: V_{sa_i} = volume de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm); $V_{sa_{i-1}}$ = volume de água armazenada no aquífero raso no dia i-1 (mm); Rc = recarga no aquífero no dia i (mm); revap = escoamento subterrâneo ou de base no canal principal no dia i (mm); Q_r = escoamento de retorno; $perc_{gw}$ = percolação da água do aquífero raso para o aquífero profundo (mm); $w_{pump,sh}$ = água retirada do aquífero raso (mm); i = passo de tempo (dia).

O aquífero raso contribui para o escoamento de base, que ocorre quando a água armazenada no aquífero excede o limite determinado pelo usuário do modelo. O escoamento de base é obtido pela equação:

$$Q_r = \left(\frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \right) \cdot h_{wtbl} \quad (26)$$

Sendo: Q_r = escoamento de retorno (mm); K_{sat} = condutividade hidráulica do aquífero (mm/dia); L_{gw} = comprimento do dreno (m); h_{wtbl} = cota piezométrica (m).

A água que percola do solo passa pela zona vadosa antes de atingir o aquífero raso. O tempo que a água leva para percolar até o aquífero raso depende da profundidade do nível freático e das propriedades hidráulicas da formação geológica.

A recarga do aquífero através da percolação pode ocorrer em um ou mais dias, sendo determinada por uma função proposta por Venetis (1969) e aplicada por Sangrey et al. (1984):

$$Rc_i = \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right) P_i + \left(e^{-(1-\delta)}\right) \cdot Rc_{i-1} \quad (27)$$

Sendo: Rc_i = recarga do aquífero no dia i (mm); δ = tempo de resposta do aquífero (dia); P_i = quantidade de água que drena do solo (mm); Rc_{i-1} = recarga do aquífero no dia $i-1$ (mm).

A água que drena do solo no dia i é obtida pela equação:

$$P_i = P_{perc} + P_{crk} \quad (28)$$

Sendo: P_i = quantidade de água que drena do solo (mm); P_{perc} = quantidade de água que percola da camada mais baixa do perfil de solo (mm); P_{crk} = quantidade de água após a camada mais baixa do perfil de solo devido ao desvio de fluxo (mm).

O parâmetro revap representa a água que retorna para o perfil do solo e é transferida para a atmosfera pela evaporação do solo ou raiz das plantas. O processo ocorre se a quantidade de água existente no aquífero raso exceder um limite especificado pelo usuário do modelo. A quantidade máxima de água que pode ser removida do aquífero por “revap” em um dia qualquer é obtida pela equação:

$$revap_{mx} = \beta_r \cdot E_o \quad (29)$$

Sendo: $revap_{mx}$ = quantidade máxima de água que é retirada do aquífero (mm); β_r = coeficiente de revap; E_o = evapotranspiração potencial (mm).

A percolação para o aquífero profundo ocorre quando a água armazenada no aquífero raso exceder o valor definido pelo usuário. A quantidade máxima de água que percola do aquífero raso para o aquífero profundo em um dia qualquer é calculada pela equação:

$$perc_{gw,mx} = \beta_{gw} \cdot Rc \quad (30)$$

Sendo: $perc_{gw,mx}$ = quantidade máxima de água que percola do aquífero raso para o aquífero profundo (mm); β_{gw} = coeficiente de percolação do aquífero; Rc = recarga no aquífero no dia i (mm).

O balanço hídrico do aquífero profundo é estimado pela equação:

$$V_{dpi} = \left(V_{dpi-1} + perc_{gw} - w_{pump,dp}\right) \quad (31)$$

Sendo: V_{dpi} = volume de água armazenada no aquífero profundo no dia i (mm); V_{dpi-1} = volume de água armazenada no aquífero profundo no dia $i-1$ (mm); $perc_{gw}$ = quantidade de

água que percola do aquífero raso para o aquífero profundo (mm); $w_{\text{pump,dp}}$ = água retirada do aquífero profundo (mm); i = passo de tempo (dia).

2.7.1.3. Propagação no Canal

A propagação no canal é dividida em dois componentes: (i) propagação da vazão líquida e (ii) propagação da vazão sólida.

2.7.1.3.1. Propagação da Vazão Líquida no Canal

A operação de propagação é realizada com um passo de tempo diário e não requer cálculos iterativos, fazendo com que o modelo seja eficiente para simular tempos longos (50 - 100 anos) sobre médias e/ou grandes bacias (1.000 a 10.000 km²). Os dados requeridos pelo modelo são: comprimento, declividade, profundidade, declividade lateral, coeficiente de Manning do canal, declividade e coeficiente de Manning da margem de inundação. A taxa de escoamento e a velocidade média do fluxo são calculadas através da equação de Manning.

Para um segmento de canal com ponto de entrada e saída próximos, o armazenamento é fundamentado pela equação da continuidade, sendo definido por:

$$\Delta V_{\text{stored}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{out}}) \quad (32)$$

Sendo: ΔV_{stored} = variação do volume de água armazenada (m³); V_{in} = volume de entrada (m³); V_{out} = volume de saída (m³).

A taxa de variação do volume de água de entrada durante um intervalo de tempo é obtida pela equação:

$$\left(q_{\text{in,ave}} + \frac{V_{\text{stored,1}}}{\Delta t} - \frac{q_{\text{out,1}}}{2} \right) = \left(\frac{V_{\text{stored,2}}}{\Delta t} + \frac{q_{\text{out,2}}}{2} \right) \quad (33)$$

Sendo: $q_{\text{in,ave}}$ = taxa de variação do volume de água de entrada (m³/s); $V_{\text{stored,1}}$ = volume armazenado no início do processo (m³); $V_{\text{stored,2}}$ = volume armazenado no fim do processo (m³); $q_{\text{out,1}}$ = vazão de saída no início do processo (m³/s); $q_{\text{out,2}}$ = vazão de saída no fim do processo (m³/s); Δt = intervalo de tempo entre o início e o final do processo (s).

O tempo de propagação no canal é uma relação entre o volume de água do canal e o escoamento, usando a seguinte equação:

$$TT = \left(\frac{V_{stored}}{q_{out}} \right) = \left(\frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} \right) = \left(\frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \right) \quad (34)$$

Sendo: TT = tempo de propagação (s); V_{stored} = volume armazenado (m^3); $V_{stored,1}$ = volume armazenado no início do processo (m^3); $V_{stored,2}$ = volume armazenado no fim do processo (m^3); q_{out} = taxa de escoamento (m^3/s); $q_{out,1}$ = vazão de saída no início do processo (m^3/s); $q_{out,2}$ = vazão de saída no fim do processo (m^3/s).

A relação entre o tempo de propagação (TT) e o coeficiente de armazenamento (SC) é calculada através da equação:

$$q_{out,2} = \left(\frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \right) \cdot q_{in,ave} + \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \right) \cdot q_{out,1} \quad (35)$$

Sendo: TT = tempo de propagação (s); Δt = intervalo de tempo entre o início e o final do processo (s); $q_{out,1}$ = vazão de saída no início do processo (m^3/s); $q_{out,2}$ = vazão de saída no fim do processo (m^3/s); $q_{in,ave}$ = taxa de variação do volume de água de entrada (m^3/s).

O coeficiente de armazenamento (SC) é estimado usando a seguinte equação:

$$SC = \left(\frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \right) \quad (36)$$

Sendo: SC = coeficiente de armazenamento; Δt = intervalo de tempo entre o início e o final do processo (s); TT = tempo de propagação (s).

O escoamento de saída do trecho considerado é determinado por:

$$q_{out,2} = SC \cdot \left(q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} \right) \quad (37)$$

Sendo: $q_{out,2}$ = vazão de saída no fim do processo (m^3/s); SC = coeficiente de armazenamento; $q_{in,ave}$ = taxa de variação do volume de água de entrada (m^3/s); $V_{stored,1}$ = volume armazenado no início do processo (m^3); Δt = intervalo de tempo entre o início e o final do processo (s).

2.7.1.4. Propagação no Reservatório

A propagação no reservatório divide-se em dois componentes: (i) propagação da vazão líquida e (ii) propagação da vazão sólida.

2.7.1.4.1. Propagação da Vazão Líquida no Reservatório

Considera o efeito da construção de reservatórios sobre a produção de água na bacia hidrográfica, através da equação do balanço hídrico:

$$VM = (VM_0 + QI - QO - EV - SEP) \quad (38)$$

Sendo: VM = volume de água armazenado no fim do dia (m^3); VM_0 = volume de água armazenado no início do dia (m^3); QI = escoamento de entrada (m^3); QO = escoamento de saída (m^3); EV = evaporação (m^3); SEP = infiltração (m^3).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste no monitoramento hidrológico e aplicação do modelo hidrológico SWAT integrado com o software de SIG ArcView (ArcSWAT 2009.93.7b), para a simulação de cenários climáticos futuros em duas pequenas bacias embutidas representativas da Mata Atlântica, no Sul do Brasil, Rancho do Amaral (coordenadas 29°37'46,49" Latitude Sul e 53°48'39,60" Longitude Oeste) e Rincão do Soturno (coordenadas 29°38'37,49" Latitude Sul e 53°48'21,99" Longitude Oeste), sub-bacias do Rio Vacacaí Mirim, localizado em Santa Maria – RS.

3.1. Caracterização Geral

O trabalho foi realizado na cabeceira do Rio Vacacaí Mirim em duas estações de medição localizadas no Rancho do Amaral, com coordenadas 29°37'46,49" Latitude Sul e 53°48'39,60" Longitude Oeste e Rincão do Soturno, com coordenadas 29°38'37,49" Latitude Sul e 53°48'21,99" Longitude Oeste, monitorando pequenas bacias embutidas e sequenciais, representativas do Bioma Mata Atlântica, na Região Sul do Brasil.

A Figura 2 apresenta a localização das estações de medição no Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

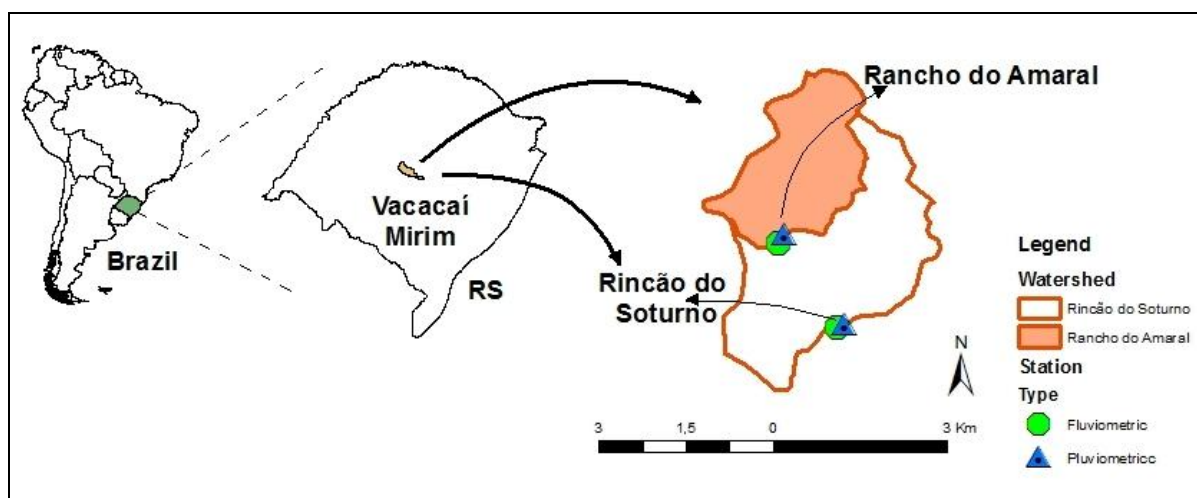


FIGURA 2: Área de estudo - Bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí Mirim e sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno (Fonte: Marcon et al., 2011).

A Figura 3 mostra a localização da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim com área total de 1145,7 km², situada na região central do Estado do Rio Grande do Sul e abrangendo

cinco municípios: Santa Maria, Restinga Seca, Itaara, São João do Polesine e Silveira Martins. O relevo é de planalto, rebordo de planalto, depressão central. Situa-se entre as coordenadas geográficas 53° 46' 30" a 53° 49' 29" de longitude Oeste e 29° 36' 55" a 29° 39' 50" de latitude Sul. Faz parte da bacia G60 – Vacacaí – Vacacaí Mirim, Região Hidrográfica do Guaíba, do Sistema Estadual de Recursos Hídricos, instituído nos termos da lei 10350/1994 e do decreto número 37034/1996, que regulamentam o Artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul (Oppa, 2007).

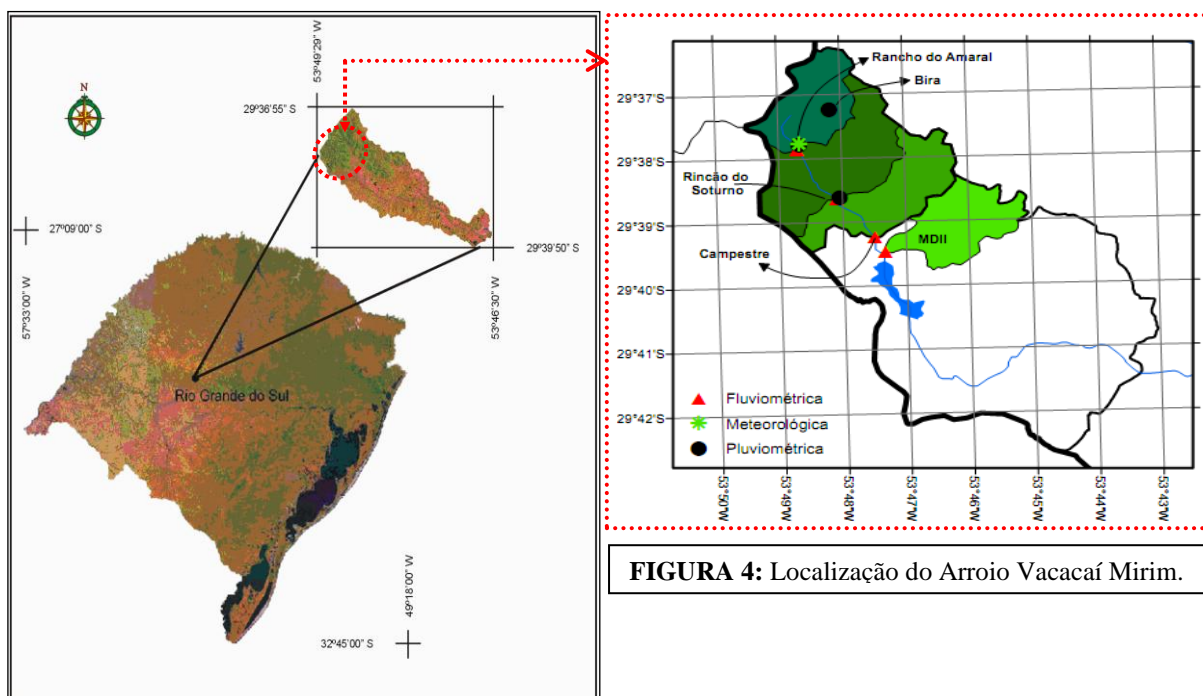


FIGURA 3: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim (Fonte: Oppa et al., 2012).

FIGURA 4: Localização do Arroio Vacacaí Mirim.

A Figura 4 apresenta o Arroio Vacacaí Mirim, com área de drenagem de aproximadamente 50 km², inserido na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim e que engloba as sub-bacias Rancho do Amaral, Rincão do Soturno e Campestre, também denominada Menino Deus I, onde o modelo SWAT foi aplicado.

A sub-bacia do Rancho do Amaral possui área de 4,5 km², o comprimento do rio principal é de aproximadamente 2,1 km, com uma diferença de cota entre a nascente e o exutório de 220 m e vazão máxima de 8,43 m³/s para um tempo de retorno de 25 anos. A largura do exutório é de 5 m e o nível da água variou de 0 a 47 cm no período de junho de 2008 a dezembro de 2009. Essa sub-bacia está embutida na sub-bacia Rincão do Soturno. O

exutório da sub-bacia Rancho do Amaral localiza-se nas coordenadas 29°37'46,49" Latitude Sul e 53°48'39,60" Longitude Oeste.

A sub-bacia do Rincão do Soturno possui área de 11,98 km², o comprimento do rio principal é de aproximadamente 4,18 km, com uma diferença de cota entre a nascente e o exutório de 265,4 m e vazão máxima de 34,34 m³/s para um tempo de retorno de 25 anos. A estação fluviográfica possui seção transversal com 8 m de largura e o nível da água variou entre 0,17 m e 1,0 m no período de junho de 2008 a dezembro de 2009. O exutório da sub-bacia do Rincão do Soturno localiza-se nas coordenadas 29°38'37,49" Latitude Sul e 53°48'21,99" Longitude Oeste.

Segundo Feltrin (2009), o relevo da região é acidentado com fortes ondulações, apresentando vales em forma de “V” por onde correm os cursos de água constituintes do sistema de drenagem da sub-bacia.

A Tabela 1 apresenta as características físicas das sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

TABELA 1 – Características Físicas da sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

Características Físicas	Rancho do Amaral	Rincão do Soturno
Área (Km ²)	4,45	11,98
Perímetro (Km)	9,72	16,08
Declividade média (%)	29	21
Comprimento do rio principal (Km)	2,1	4,18
Tempo de concentração (min.)	110	150
Altitude média (m)	341,21	316,21
Rede de drenagem	Dendritica	Dendritica

3.2. Caracterização do Clima de Santa Maria

De acordo com Moreno (1961), o clima mesotérmico e úmido da região defini-se, conforme a classificação de Köppen, como do tipo fundamental Cfa, caracterizado como subtropical úmido, com verões quentes e sem estação seca definida. Segundo Heldwein et al. (2009), os principais fatores que condicionam esse clima são: latitude, altitude, continentalidade, orografia e circulação secundária da atmosfera.

A temperatura média anual, no período de 1912-2004, é de 19,1°C. O mês mais quente é janeiro, com temperatura média normal de 24,7°C; em seguida, o calor diminui

gradualmente até junho e julho, quando a média diária mensal atinge 13,8°C, logo após as temperaturas voltam a aumentar fechando um ciclo. O verão é bastante quente, com média mensal normal das temperaturas máximas diárias do ar acima de 29,5°C nos meses de dezembro a fevereiro. Os períodos de maior calor, geralmente correspondem à ocorrência do vento Norte por vários dias, e quando essa condição é acompanhada de estiagem, podem ocorrer temperaturas máximas diárias extremamente elevadas. O inverno é ameno, porém sujeito a ondas de frio provocadas pelo deslocamento frequente de anticiclones polares migratórios, que podem causar geadas, por vezes intensas. Entre junho e agosto registram-se as temperaturas mais baixas. As médias mensais das temperaturas mínimas possuem tendência climática de aumento de 0,02°C por ano nos últimos 40 anos na cidade de Santa Maria. Existem períodos de grande flutuação de temperatura no inverno, atingindo valores altos para essa época nos dias de predominância de “vento Norte”, em contraposição a noites límpidas muito frias, quando os anticiclones polares migratórios estão agindo sobre a região (Heldwein et al., 2009).

A disponibilidade de radiação solar e de insolação (tempo em que não há sombreamento por nuvens e nevoeiro) em Santa Maria é uma das menores do estado do Rio Grande do Sul devido a duas causas principais: alta frequência de nevoeiros (92 dias por ano) e nebulosidade ligeiramente maior. Portanto, de junho a agosto, o valor normal de insolação não atinge 5,1 horas por dia e nos meses de dezembro e janeiro ultrapassa levemente o valor de 8 horas por dia. Entretanto, a duração astronômica do dia varia ao longo do ano desde o máximo de 13h:55min em 21 de dezembro a 10h:05min em 21 de junho. A disponibilidade de energia solar é máxima em dias límpidos, entre 15 e 25 de dezembro, atingindo valor máximo de 28,7 MJ m⁻² dia⁻¹, e mínima na segunda quinzena de junho (Heldwein et al., 2009).

Conforme a série histórica de 1912 a 2004, da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Santa Maria, o regime pluviométrico do município é isoigro, ou seja, os valores normais de chuva são bem distribuídos ao longo do ano (Buriol et al., 2006 apud Heldwein et al., 2009). As médias mensais normais oscilam de 120,1mm (novembro) e 126,8 mm (agosto) a 159 mm (setembro e outubro), acumulando-se no ano uma média normal de 1.712,4 mm. A precipitação de granizo ocorre em média duas vezes por ano. (Heldwein et al., 2009).

A umidade relativa do ar (UR) é um dos parâmetros de quantificação do conteúdo de vapor de água na atmosfera, com valores variando de 0 a 100%. Devido ao regime pluviométrico isoigro e a variação anual da temperatura, Santa Maria tem clima subtropical úmido, com umidade relativa do ar elevada ao longo do ano. Considerando o período de

1969-2004, a UR média anual em Santa Maria é de 77%, variando de 60% em dezembro a 83% em maio e junho.

Em Santa Maria predominam os ventos de E (Este) e de ESSE (Este-Sudeste), respectivamente, com velocidade média anual de 1,9 m/s (Heldwein et al., 2009).

A precipitação média anual varia de 1.700 a 1.800 mm, com uma frequência de 113 dias. Entretanto, a região pode sofrer um déficit anual superior a 200 mm de precipitação. A umidade relativa do ar média anual é de 82%, com ventos predominantes de leste e sudoeste, além dos ventos que sopram do quadrante norte (MORENO, 1961). Analisando-se os valores médios das precipitações mensais para a região da cidade de Santa Maria, observa-se que as precipitações são bastante homogêneas, variando de 130 a 150 mm mensais ao longo de todo ano.

3.3. Dados de Entrada do Modelo SWAT

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) requer dados de entrada relacionados às características físicas da bacia hidrográfica. Através da interface ArcSWAT, o modelo SWAT se associa ao software de geoprocessamento ArcGIS, onde atividades de pré-processamento permitem a organização dos dados gráficos (mapas de elevação, rede de drenagem, uso e tipo de solo) e dados tabulares.

Em cada sub-bacia, Rancho do Amaral e Rincão do Soturno, há uma estação de monitoramento que foi implantada em agosto de 2007. No momento, a estação de monitoramento da sub-bacia Rincão do Soturno está desativada. Os dados de precipitação e as medidas de nível foram obtidos dessas estações.

O monitoramento das precipitações ocorreu através de dois pluviógrafos, um instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, com coordenadas 29°37'46,49" Latitude Sul e 53°48'39,60" Longitude Oeste e outro na sub-bacia Rincão do Soturno, com coordenadas 29°38'37,49" Latitude Sul e 53°48'21,99" Longitude Oeste. Nas seções de medição das sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno encontrava-se em operação uma estação fluviográfica dotada de ponte hidrométrica, régua hidrométrica; e um linígrafo eletrônico de bóia, com data-logger.

As medidas de nível foram feitas continuamente com um registrador de nível com data-logger, configurado para registrar o nível em intervalos de tempo de 1 minuto e sempre que houver uma variação de pelo menos 5 mm. Variações inferiores de nível são devido à flutuação natural da superfície do escoamento.

As medições de descarga líquida foram realizadas semanalmente, no período de junho de 2008 a dezembro de 2009, de forma não-estrutural, com o auxílio de micromolinetes ou sensor de velocidade magnético indutivo. Os cálculos de descarga líquida foram feitos pelo método área-velocidade. O espaçamento entre verticais foi de 0,5 m para a estação fluviográfica Rancho do Amaral e 1,0 m para a estação Rincão do Soturno.

O período de dados de entrada utilizado nesta pesquisa corresponde a junho/2008 a dezembro/2009.

A Figura 5 apresenta as seções transversais da estação fluviográfica Rancho do Amaral e Rincão do Soturno, respectivamente.

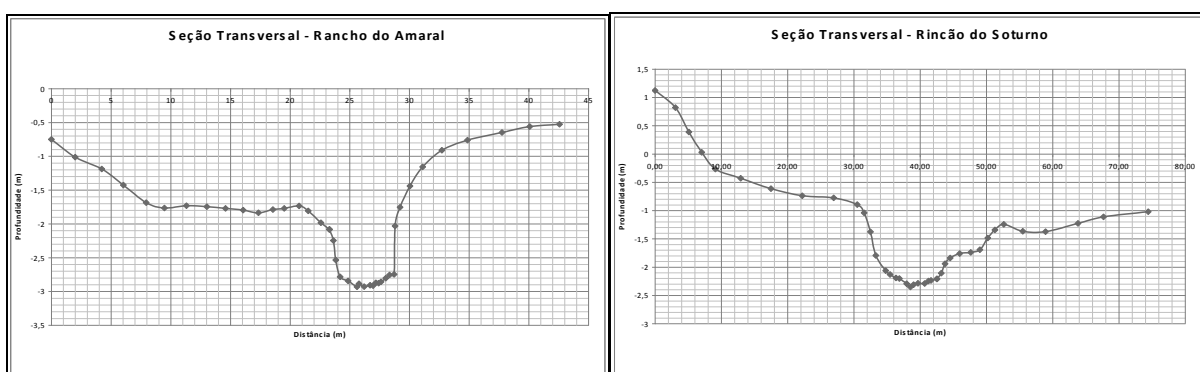


FIGURA 5: Seção transversal da estação fluviográfica Rancho do Amaral e Rincão do Soturno, respectivamente. (Fonte: Oppa et al., 2008).

A Figura 6A e 6B, ilustra as seções de monitoramento das sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno, respectivamente.



FIGURA 6: Seção de Monitoramento: (A) Bacia Rancho do Amaral; (B) Bacia Rincão do Soturno.

Para as variáveis climáticas requeridas pelo modelo SWAT: dados de temperaturas do ar máximas e mínimas em °C, radiação solar em MJ/m²/dia, umidade relativa do ar em % e

velocidade do vento em m/s; foram utilizadas séries diárias (período de junho/2008 a dezembro/2009) fornecidas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e pela estação climatológica Santa Maria (83936), pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia do INMET, instalada no campus da Universidade Federal de Santa Maria, e operada pelo Departamento de Fitotecnia do Centro de Ciências Rurais. A estação climatológica Santa Maria está localizada nas coordenadas 29°42' latitude Sul e 53°42' longitude Oeste, com altitude de 95 m.

Nesta pesquisa foi utilizado o método do SCS Curva-Número para determinação do escoamento superficial.

A evapotranspiração potencial pode ser calculada pelo modelo através dos seguintes métodos: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith. Nas simulações, utilizou-se o método de Penman-Monteith, o qual requer séries diárias de radiação solar em MJ/m²/dia, temperatura máxima e mínima do ar em °C, umidade relativa em % e velocidade do vento em m/s.

A radiação solar estimada a partir da insolação, foi calculada através da metodologia apresentada por Estefanel et al. (1990).

O cálculo da média diária da umidade relativa foi feito com as observações das 9 (UR9h), 15 (UR15h) e 21 horas (UR21h), utilizando-se a equação proposta por Heldwein et al. (2009).

O cálculo da média diária da velocidade do vento foi feito com a média das observações das 9, 15 e 21 horas, respectivamente.

Os mapas da rede de drenagem, do relevo, de uso e classificação do solo da sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno foram obtidos com base na imagem de satélite IKONOS, a qual foi processada com o auxílio do software ArcGis 9.3. A resolução dos pixels utilizada para o modelo foi de 10 m.

3.3.1. Informações Cartográficas e Classificação dos Solos da Bacia

Para a classificação e mapeamento dos solos presentes na sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno utilizou-se como base os trabalhos de Dias (2003), Casagrande (2004), Feltrin (2009), Pereira (2010) e Sari (2011), onde consta o mapa de solos da bacia hidrográfica do arroio Vacacaí Mirim, elaborado por Azolin e Mutti (1988), na escala 1:100000.

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, sugerido pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias - EMBRAPA (1999), os tipos de solos presentes na sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno são:

Rd1: Neossolo Litólico Distrófico relevo ondulado;

Re4: Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico;

Re-C-Co: Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios;

TBa-Rd: Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico.

Na Tabela 2 é apresentada a distribuição dos solos para a sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno em porcentagem.

TABELA 2 – Distribuição dos tipos de solos na sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

Tipo de Solo	Rancho do Amaral (%)	Rincão do Soturno (%)
Re4	80,81	54,18
Re-C-Co	1,58	23,62
Tba-Rd	0,11	13,52
Rd1	17,60	8,68

Fonte: Marcon et al., 2011.

A área das sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno apresentam grande área de mata nativa característica do Bioma Mata Atlântica, campo nativo, pastagens, agricultura de cultivos anuais e permanentes, pecuária, área em urbanização e plantios de eucalipto (*Eucaliptus sp*).

Na Tabela 3 são apresentados os usos dos solos para a sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno em porcentagem.

TABELA 3 – Distribuição dos usos dos solos na sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

Usos do Solo	Rancho do Amaral (%)	Rincão do Soturno (%)
Mata Nativa	47,62	54,76
Campo ou Vegetação	39,38	38,98
Floresta Implantada	8,15	3,84
Agricultura	3,64	1,74
Água	1,21	0,73

Fonte: Marcon et al., 2011.

A Figura 7 exibe os mapas da rede de drenagem e relevo da sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

A Figura 8 apresenta o mapa dos tipos de solos e a Figura 9 o mapa dos usos de solos das sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

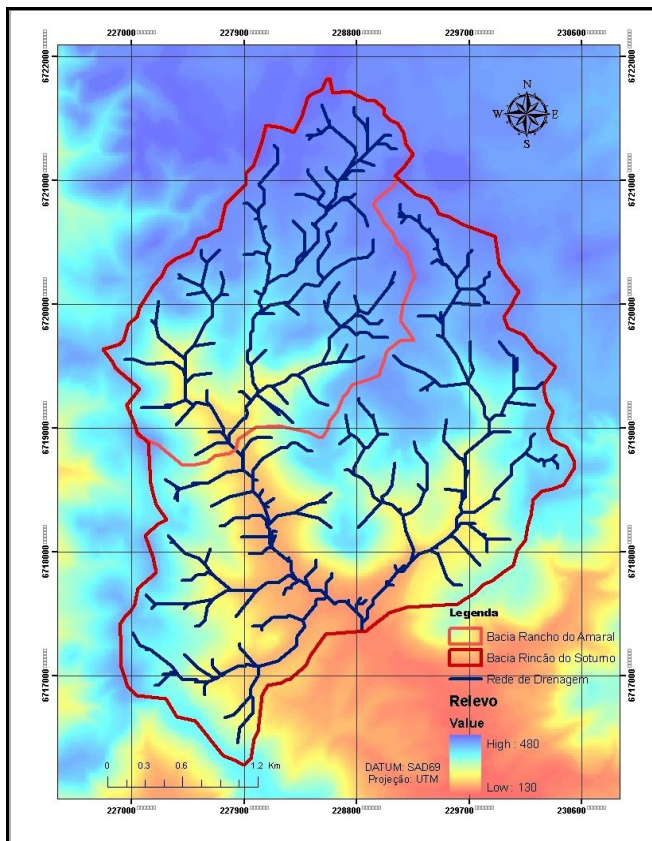


FIGURA 7: Rede de Drenagem e Relevo da Sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

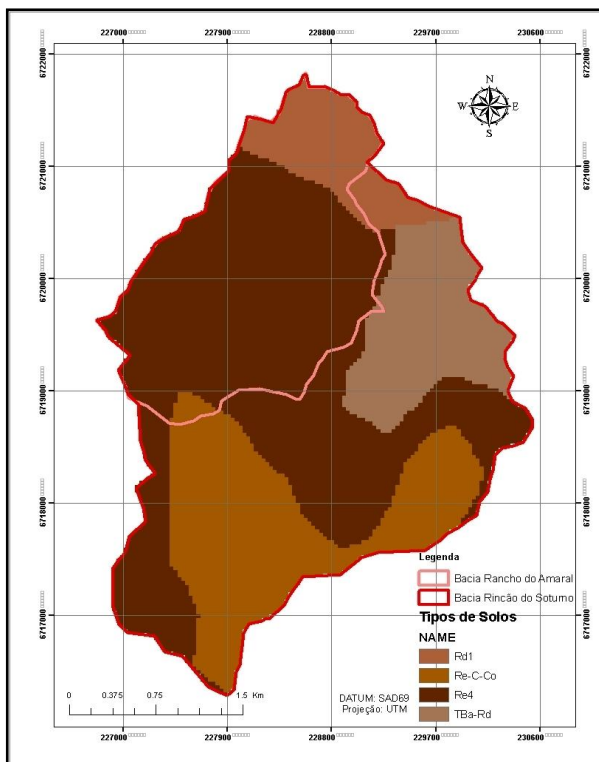


FIGURA 8: Tipos de Solos da Sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

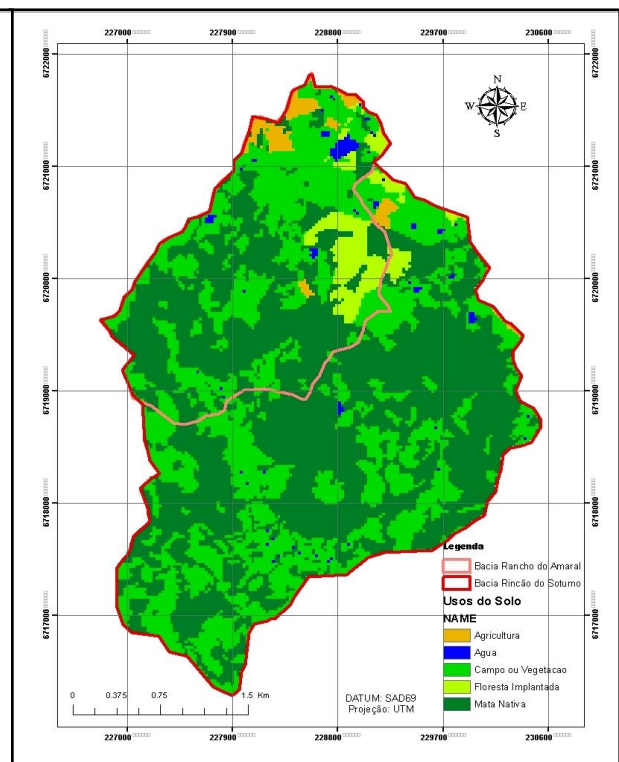


FIGURA 9: Usos do Solo da Sub-bacia Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

O banco de dados do modelo hidrológico SWAT requer além dos mapas de tipo e uso dos solos, características físicas e hidrológicas como as descritas na Tabela 4.

TABELA 4 – Informações do banco de dados de solos.

Nº.	Sigla	Descrição	Unidade
01	SNAM (a)	Nome do solo	-
02	NLAYER (a)	Número de camadas/horizontes	-
03	HYDGRP (a)	Grupo hidrológico	-
04	SOL_ZMX (a)	Profundidade máxima da zona de raízes	mm
05	ANION_EXCL (a)	Fração da porosidade com ânions ativos	Fração
06	SOL_CRK (a)	Volume potencial máximo do perfil de solo composto por fissuras como uma fração do volume total do solo	m ³ /m ³
07	SOL_Z (a)	Profundidade da superfície do solo até o fundo da camada de solo	mm
08	SOL_BD (b)	Densidade aparente (úmida)	g/cm ³
09	SOL_AWC (b)	Capacidade de água disponível na camada	mm H ₂ O/ mm Solo
10	SOL_K (b)	Condutividade hidráulica saturada	mm/h
11	SOL_CBN (b)	Porcentagem de carbono orgânico	% peso de solo
12	CLAY (b)	Porcentagem de argila	% peso de solo
13	SILT (b)	Porcentagem de silte	% peso de solo
14	SAND (b)	Porcentagem de areia	% peso de solo
15	ROCK (b)	Porcentagem de fragmentos de rocha (pedregulhos e pedras)	% peso de solo
16	SOL_ALB (b)	Albedo do solo úmido	Fração
17	SOL_EC (b)	Condutividade elétrica	dS/m
18	USLE_K (b)	Coefficiente de erodibilidade do solo (USLE)	m ² hr/(m ³ t cm)

NOTA: (a) dados por tipo de solos; (b) dados por camada de solos. Fonte: Neitsch et al., 2009.

As informações do banco de solos de 01 a 17 (Tabela 4) utilizadas nesta pesquisa foram obtidas do trabalho de Paiva e Paiva (2006), que avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT na Bacia Menino Deus I (também denominada Campestre), visto que a mesma engloba as sub-bacias Rancho do Amaral e Rincão do Soturno.

O parâmetro USLE_K (Coeficiente de erodibilidade do solo), item 18 da Tabela 4, foi calculado consoante com a fórmula proposta por Willians (1995), descrita no manual do modelo SWAT.

O grupo hidrológico (HYDGRP), segundo o U.S Natural Resource Conservation Service (NRCS, 2007) é a classificação dos solos em grupos: A, B, C ou D, conforme a sua capacidade de infiltração e a produção de escoamento superficial, sendo que a infiltração é decrescente do grupo A para o D, como mostra a Tabela 5.

TABELA 5 – Classificação dos solos em grupos hidrológicos.

Nº.	Grupo	Taxa de Infiltração	Condutividade Hidráulica Saturada (mm/h)
01	A	Alta	> 150
02	B	Moderada	entre 5 e 150
03	C	Baixa	entre 1 e 5
04	D	Baixíssima	< 1

Fonte: Natural Resource Conservation Service (NRCS), 2007.

3.4. Calibração e Verificação do Modelo SWAT

A calibração, inicialmente, foi manual, em intervalo de tempo diário e mensal, com os valores dos parâmetros atribuídos a todas as sub-bacias. Os parâmetros usados na calibração foram escolhidos através da literatura, com a opção de substituí-lo ou multiplicá-lo por um determinado valor. A multiplicação preserva a proporção, sendo que o sinal negativo indica uma redução no parâmetro em questão e o sinal positivo indica um acréscimo no mesmo, pois cada sub-bacia, HRU ou tipo de solo, tem um valor inicial próprio para determinado parâmetro. Para se perceber a influência de cada um dos parâmetros sobre o volume escoado, variou-se um parâmetro por vez, deixando os demais fixos, através da técnica de tentativa e erro, até chegar-se a uma calibração que apresentasse valores médios. Após, procedeu-se a calibração automática através do software SWAT-CUP, que foi criado com o objetivo de auxiliar na calibração do modelo SWAT. O SWAT-CUP utiliza a metodologia GLUE e os algoritmos PARASOL, SUFI-2, MCMC para calibração automática e análise de incertezas do SWAT (ABBASPOUR, 2008).

Os dados de entrada disponíveis correspondem ao período de junho de 2008 a dezembro de 2009. Os dados de junho de 2008 a dezembro de 2008 foram usados para o aquecimento do modelo. A calibração da vazão foi realizada entre janeiro e dezembro de 2009.

Devido ao pequeno período de monitoramento, para a verificação da qualidade do ajuste dos resultados do modelo utilizou-se os resultados obtidos na seção fluviométrica intermediária, com área de 4,5 Km², correspondente ao exutório do Rancho do Amaral. Portanto, para o período de verificação do modelo, consideraram-se duas estações dentro da bacia Rincão do Soturno, sendo um o seu exutório e o outro corresponde ao Rancho do Amaral que está inserido dentro da bacia Rincão do Soturno. Como o modelo divide a bacia em sub-bacias, considerou-se o ponto da bacia Rincão do Soturno correspondente ao exutório

do Rancho do Amaral para verificação do modelo SWAT, através da confrontação destes dados simulados com os obtidos na simulação da estação do Rancho do Amaral. A calibração foi realizada nos pontos monitorados e a verificação no exutório correspondente a cada bacia. A verificação é importante para inferir se o modelo está representando a dinâmica da bacia.

A Figura 10 apresenta a divisão da bacia Rincão do Soturno em sub-bacias, pelo modelo hidrológico SWAT, onde a sub-bacia 13 corresponde ao exutório da bacia Rancho do Amaral e a sub-bacia 27 corresponde ao exutório da bacia Rincão do Soturno.

A Figura 11 mostra a divisão da bacia Rancho do Amaral em sub-bacias, pelo modelo hidrológico SWAT, onde a sub-bacia 27 corresponde ao seu exutório.

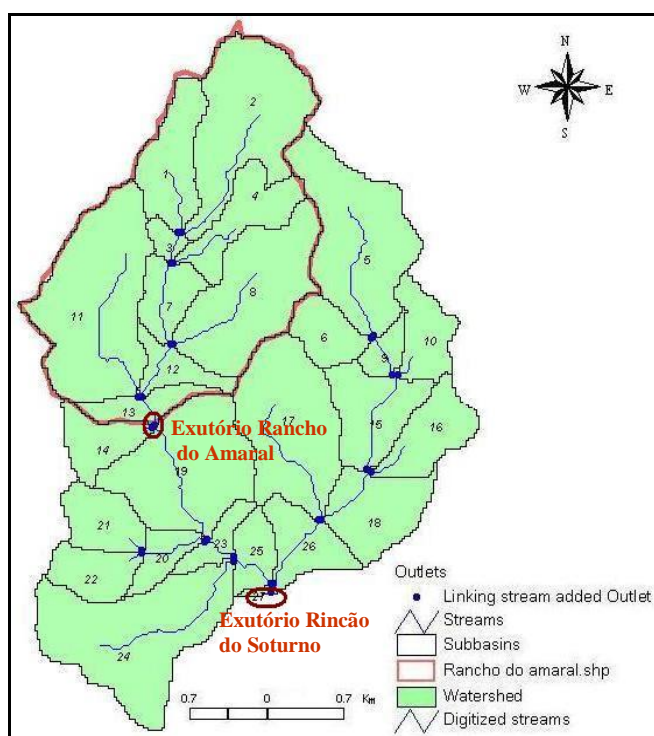


FIGURA 10: Bacia Rincão do Soturno e Divisão das Sub-bacias.

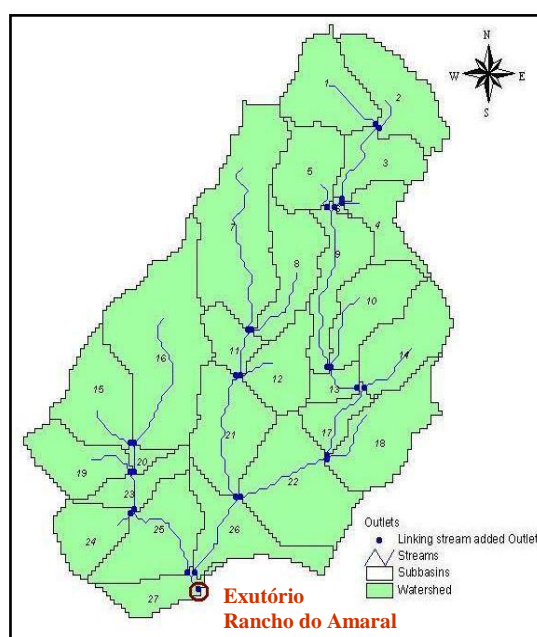


FIGURA 11: Bacia Rancho do Amaral e Divisão das Sub-bacias.

Para avaliar o desempenho do ajuste do modelo, nas etapas de calibração e verificação, utilizou-se da inspeção visual do hidrograma vazão observada x vazão calculada, do coeficiente de determinação (R^2) e do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (1970).

O coeficiente de determinação (R^2) varia de 0 a 1, mostrando o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, em porcentagem. Quanto maior o valor de R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) varia de infinito negativo até o valor máximo de 1, que representa a eficiência máxima, é o método mais utilizado para avaliação da eficiência de modelos hidrológicos, porém dá peso maior às vazões máximas.

O coeficiente de determinação (R^2) é calculado por:

$$R^2 = \frac{\left(\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{calc} - \overline{Q_{calc}})\right)^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{calc} - \overline{Q_{calc}})^2} \quad (39)$$

Sendo: Q_{obs} = vazão observada; Q_{calc} = vazão calculada; $\overline{Q_{obs}}$ = média da vazão observada no período; $\overline{Q_{calc}}$ = média da vazão calculada no período.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é obtido pela expressão:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (40)$$

Sendo: Q_{obs} = vazão observada; Q_{calc} = vazão calculada; $\overline{Q_{obs}}$ = média da vazão observada no período.

De acordo com Arnold et al. (2000), o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é sensível a mais de 100 parâmetros que se correlacionam com a vegetação, manejo do solo, solos, clima, aquífero, canal e reservatório. O modelo pode ser calibrado para o balanço da água e escoamento, produção de sedimentos, nutrientes e pesticidas.

As variáveis que apresentam maior sensibilidade estão descritas no manual do modelo SWAT, sendo que para o ajuste da vazão observada e calculada, destacam-se: CN2 (Curva Número - os valores de CN variam para diferentes classes, usos e ocupação do solo), SOL_AWC (capacidade de água disponível no horizonte do solo) e ESCO (fator de compensação de evaporação do solo), nesta sequência e, para fluxo de base, tem-se: ALPHA_BF (fator do fluxo de base ou constante de recessão, sendo a taxa na qual a água subterrânea retorna ao rio em dias), SURLAG (coeficiente de atraso do escoamento superficial) e GW_REVAP (variável que controla a quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes) (NEITSCH et al., 2009).

A Tabela 6 apresenta a descrição e os valores dos parâmetros utilizados na calibração manual do modelo SWAT.

A Tabela 7 mostra a descrição e os valores dos parâmetros utilizados na calibração automática do SWAT.

TABELA 6 – Descrição e valores utilizados na calibração manual do modelo SWAT.

Nº.	Parâmetro e Operação	Descrição	Valor Calibrado
01	CAN_MX (1)	Interceptação máxima da vegetação (mm H ₂ O)	47,8
02	ESCO (1)	Coefficiente de compensação da evaporação do solo (adimensional)	0,95
03	EPCO (1)	Fator de compensação para uso de água pelas plantas (adimensional)	1
04	SURLAG (1)	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (dias)	24
05	PHU (1)	Unidade de calor potencial	1500
06	FFCB (1)	Quantidade inicial de água no solo em fração de capacidade de água disponível	0,5
07	CH_K1 (1)	Condutividade hidráulica na base do canal principal (mm/h)	0
08	SOL_Z (1)	Profundidade da superfície até a base do horizonte do solo (mm)	3250
09	SLSUBBASIN (1)	Comprimento de rampa médio para a sub-bacia, adotado como sendo o mesmo valor utilizado para o comprimento de rampa do escoamento lateral (m)	10
10	CNCOEF (1)	Coefficiente curva número	0,5
11	ICN (1)	Método de cálculo diário da curva número	0
12	SLOPE (1)	Declividade média (m/m)	0,21

NOTA: Operação: (1) substituição direta.

TABELA 7 – Descrição e valores utilizados na calibração automática do modelo SWAT.

Nº.	Parâmetro e Operação	Descrição	Valor Calibrado
01	ALPHA_BF (1)	Fator do fluxo de base ou constante de recessão (dias)	0,7875
02	GW_DELAY (1)	Tempo de atraso de águas subterrâneas (dias)	192,75
03	GWQMN (1)	Profundidade de água subterrânea requerida para que o retorno do fluxo ocorra (mm)	1,375
04	GW_REVAP (1)	Variável que controla a quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes (adimensional)	0,1625
05	CH_N2 (1)	Coefficiente de rugosidade do canal principal (m ^{-1/3} /s)	0,05
06	CH_K2 (1)	Condutividade hidráulica na base do canal principal (mm/h)	103,437
07	ALPHA_BNK (1)	Fator de fluxo de armazenamento (dias)	0,1125
08	CN2 (2)	Curva número (adimensional)	-12%
09	SFTMP (1)	Temperatura para ocorrer a precipitação de neve (°C)	-1,375
10	ESCO (1)	Coefficiente de compensação de evaporação no solo (adimensional)	0,8125
11	SOL_AWC1 (2)	Capacidade de água disponível no horizonte do solo (mm/mm)	-14,75%
12	SOL_K1 (2)	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)	-34%
13	SOL_BD1 (2)	Densidade aparente (úmida) (g/cm ³)	-12,87%

NOTA: Operação: (1) substituição direta; (2) multiplicação (%), sendo que o sinal negativo (-) na frente do valor calibrado indica um fator de redução no valor do parâmetro em questão.

De acordo com Arnold et. al. (1995) e Arnold e Allen (1999), o parâmetro ALPHA_BF avalia de forma direta a resposta da vazão subterrânea em função da recarga,

tendo relação direta com as recessões do hidrograma. Os valores variam de 0,1 a 0,3 para locais onde a recarga é lenta, e 0,9 a 1,0 em locais sensíveis à recarga.

O dossel das árvores afeta a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração, ao interceptar as gotas da chuva e armazenar parte da água. O parâmetro CANMX é a quantidade máxima de água que pode ser armazenada em um dossel completamente desenvolvido (mm H₂O). O SWAT calcula a quantidade máxima de água retida no dossel no dia através do índice de área foliar.

A curva número (CN2) para a condição II de umidade do solo relaciona-se com a infiltração e o escoamento superficial na bacia sendo função da permeabilidade do solo, uso do solo e condições anteriores de umidade no solo.

O parâmetro EPCO varia de 0,01 a 1. Quanto mais próximo de 1, o teor de umidade das camadas superficiais do perfil diminui e as plantas compensam nas camadas mais profundas.

O parâmetro ESCO varia de 0 a 1 e está associado à evapotranspiração na bacia. Segundo Cibin (2010), o coeficiente de compensação da evaporação do solo modifica a profundidade usada para determinar a demanda evaporativa do solo, considerando o efeito da capilaridade, quando os valores diminuem, o modelo extrai mais água de níveis mais baixos.

O parâmetro GW_DELAY controla o tempo de recarga do aquífero e está relacionado com o escoamento de base.

O parâmetro GW_REVAP controla o fluxo de água da zona saturada (aquífero) para a zona não saturada do solo, variando com o tipo de uso do solo. O movimento de água de um aquífero raso para a zona que contém raízes é restringido quando o valor de GW_REVAP se aproxima de 0, e para valores próximos de 1, a taxa de transferência do aquífero para a zona radicular aproxima-se as taxas de evapotranspiração potencial.

Se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou maior do que o parâmetro GWQMN, a água subterrânea atinge a superfície.

O parâmetro SLSUBBSN é medido do topo da encosta até o ponto onde o escoamento começa a se concentrar. Influi na taxa de pico do escoamento, escoamento superficial e produção de sedimentos.

O parâmetro SOL_AWC está associado a percolação, evaporação e dinâmica da água subterrânea na bacia; sendo obtido pela diferença entre a quantidade de água na capacidade de campo e a fração de água do ponto de murcha permanente.

O parâmetro SOL_K relaciona a taxa do fluxo de água com o gradiente hidráulico. Atua na percolação, fluxa lateral e dinâmica da água subterrânea.

O parâmetro SOL_Z é a profundidade entre a superfície do solo e a camada mais profunda. De acordo com Sarmento (2010), este parâmetro é importante para a temperatura do solo, percolação e evaporação.

O parâmetro SLOPE representa a declividade média de cada sub-bacia. Atua no escoamento superficial, taxa de escoamento de pico, fluxo lateral e produção de sedimentos.

O parâmetro SURLAG controla a fração de água disponível para abastecer diariamente o canal, quanto maior seu valor, menor o efeito de atraso do escoamento superficial da bacia.

O parâmetro SFTMP representa a temperatura para ocorrer a precipitação de neve na bacia hidrográfica.

3.4. Cenários Climáticos Futuros

Os cenários climáticos futuros criados para a bacia Rincão do Soturno, no período de 2071 a 2100, foram gerados pelo modelo climático regional Precis (Providing Regional Climates for Impacts Studies) - Hadley Center, o HadRM3P, com uma resolução espacial de 50 km, com -29,5° de latitude e -54° de longitude, série temporal diária, para as variáveis meteorológicas: precipitação (mm) e temperatura do ar máxima (°C), média (°C) e mínima (°C). Esses dados foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), dentro do projeto CLIMASUL (Estudo de Mudanças Climáticas na Região Sul do Brasil).

Na simulação dos cenários climáticos futuros, o período de monitoramento de junho de 2008 a dezembro de 2009 foi utilizado como período de aquecimento do modelo SWAT e os dados gerados pelo modelo climático regional Precis (Providing Regional Climates for Impacts Studies) - Hadley Center, o HadRM3P, no período de 2071 a 2100, foram utilizados para gerar as projeções de mudanças climáticas futuras, cenários futuros A2 e B2. Os mesmos são descritos abaixo:

- **Cenário A2:** reflete a alta emissão de gases de efeito estufa, sendo considerado pessimista.
- **Cenário B2:** reflete a baixa emissão de gases de efeito estufa, sendo considerado otimista.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Calibração e Verificação do Modelo SWAT

Os resultados da calibração e verificação do modelo SWAT para a vazão são apresentados na Tabela 8 abaixo.

TABELA 8 - Parâmetros de avaliação do modelo SWAT.

Parâmetro	Bacia Rincão do Soturno		Bacia Rancho do Amaral
	- Calibração -	Bacia Rancho do Amaral (Seção Fluviométrica Intermediária) - Verificação -	- Verificação -
	<i>Valores Mensais</i>	<i>Valores Mensais</i>	<i>Valores Mensais</i>
NSE	0,60	0,75	0,80
R ²	0,61	0,75	0,81
	<i>Valores Diários</i>	<i>Valores Diários</i>	<i>Valores Diários</i>
NSE	0,36	0,37	0,36
R ²	0,37	0,37	0,38

NOTA: Onde: NSE é o coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970) e R² é o coeficiente de determinação.

A qualidade do ajuste dos resultados foi caracterizada pelo índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e pelo coeficiente de determinação R². O modelo foi avaliado na escala mensal e diária. Na escala mensal os valores obtidos para NSE, na fase de calibração, foram de 0,60 e 0,80, respectivamente para as duas secções. Os valores obtidos para o R² foram 0,61 e 0,81 nas mesmas secções. Na escala diária os valores obtidos para NSE, na fase de calibração, foi de 0,36 para ambas as secções e os valores obtidos para o R² foram 0,37 e 0,38 nas mesmas secções. Estes resultados mostram que o ajuste foi bom para valores mensais, o mesmo não ocorrendo para os valores diários.

Devido ao pequeno período de monitoramento, para a verificação da qualidade do ajuste dos resultados do modelo utilizou-se os resultados obtidos na seção fluviométrica intermediária para validar o modelo, com área de 4,5 Km². Os valores obtidos para o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) na verificação foram 0,75 para simulação mensal e 0,37 para a simulação diária e os valores obtidos para o coeficiente de determinação (R²) foram 0,75 para valores mensais e 0,37 para valores diários, o que valida o ajuste. Estes resultados

estão em concordância com os valores encontrados por Paiva e Paiva (2006a), que avaliaram o SWAT em uma seção de jusante, na mesma bacia, com área de 18 km². No estudo de Paiva e Paiva (2006a), o ajuste a nível diário apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,54. O modelo superestimou o volume total em 12%. A nível mensal obteve-se para o coeficiente de determinação (R^2) e o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) o valor de 0,88. Nesse caso, como a bacia é maior, os valores diários tiveram um melhor ajuste. Bonumá (2011) aplicou o modelo para uma pequena bacia (4.18 km²) localizada no sul do Brasil, com o uso principal do solo para a cultura de tabaco. Para a simulação mensal de vazão, encontrou-se para o coeficiente de Nash-Sutcliffe valores de 0.87 para calibração e 0.76 para a verificação. Arnold et al. (2000) obteve um R^2 igual a 0,65 para o modelo SWAT, simulando as vazões do rio Mississippi (EUA). Srinivasan et al. (1998) por sua vez, obteve R^2 de 0,65 e 0,82 para as vazões mensais de duas estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Richland-Chambers (EUA). Lopes e Kobiyama (2008a) aplicaram o modelo SWAT em uma microbacia experimental escola na região norte do Estado de Santa Catarina, com uso do solo de reflorestamento de pinus e cobertura de vegetação nativa, e encontraram 0,23 para NSE e 0,51 para R^2 para a calibração de dados diários de vazão no período de janeiro de 2006 a outubro de 2007. Gibertoni et al. (2009) aplicou o modelo na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, drenante à Baía de Antonina, litoral do Estado do Paraná, obtendo 0,42 para NSE e 0,47 para o R^2 na calibração de vazão com dados diários no período de 1975 a 1991, e 0,53 para NSE e 0,54 para R^2 na verificação no período de 1992 a 2007. Já para dados mensais, obteve 0,81 para NSE e 0,65 para calibração da vazão e 0,74 e 0,72 para verificação.

Estes resultados mostram que o modelo SWAT se adapta bem nesta região com passo de tempo mensal. Provavelmente, os baixos valores de ajuste na calibração diária e os principais problemas de utilização do modelo são devidos ao tamanho da bacia, ao pequeno período de dados e a necessidade de maiores informações sobre a caracterização física do solo. Observa-se que quanto maior a escala (diária < mensal < anual), melhor o ajuste do modelo SWAT.

Nos Gráficos de 1 a 3 são apresentados os hidrogramas com os dados observados e simulados, para o período de calibração do modelo SWAT na Bacia Rincão do Soturno em escala diária.

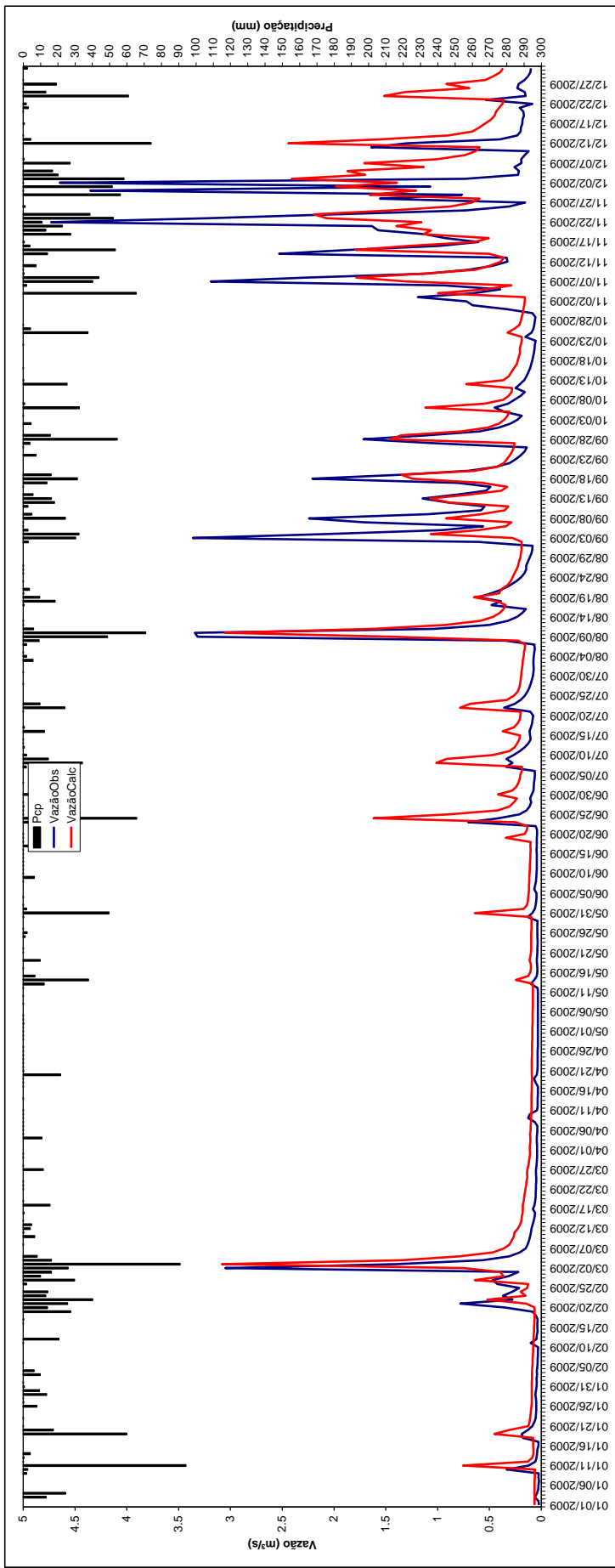


GRÁFICO 1 – Vazão Diária - Bacia Rincão do Soturno – Calibração

Analisando-se o hidrograma vazão observada e calculada da Bacia Rincão do Soturno em escala diária (Gráfico 1), observa-se a diferença entre os valores mínimos (escoamento de base) e máximos (picos), mas o modelo reproduziu bem a distribuição e alguns picos foram adequadamente simulados. No Gráfico 2 é apresentada a curva de permanência das vazões diárias observadas e calculadas, onde se observa que em torno de 6,5% ocorre a interseção das duas curvas, indicando que o modelo subestimou as vazões de pico e superestimou as vazões com permanência maior que 6,5%, o que pode se justificar pelo tamanho da bacia, relevo montanhoso e as características da relação rio – aquífero, com leito rochoso, que contribuem para incertezas nos resultados das medições das baixas vazões. Oppa et al. (2008) analisou os erros de medição de vazão e efeitos na curva-chave da bacia em questão, concluindo que rios de montanha apresentam singularidades de escoamento sub-superficial e leito rochoso o que prejudica a medição de vazão e, conseqüentemente a construção da curva-chave em vazões baixas. Outro fator que contribui para erros nos dados monitorados é a construção de estruturas de barramento executadas pela população ribeirinha do local.

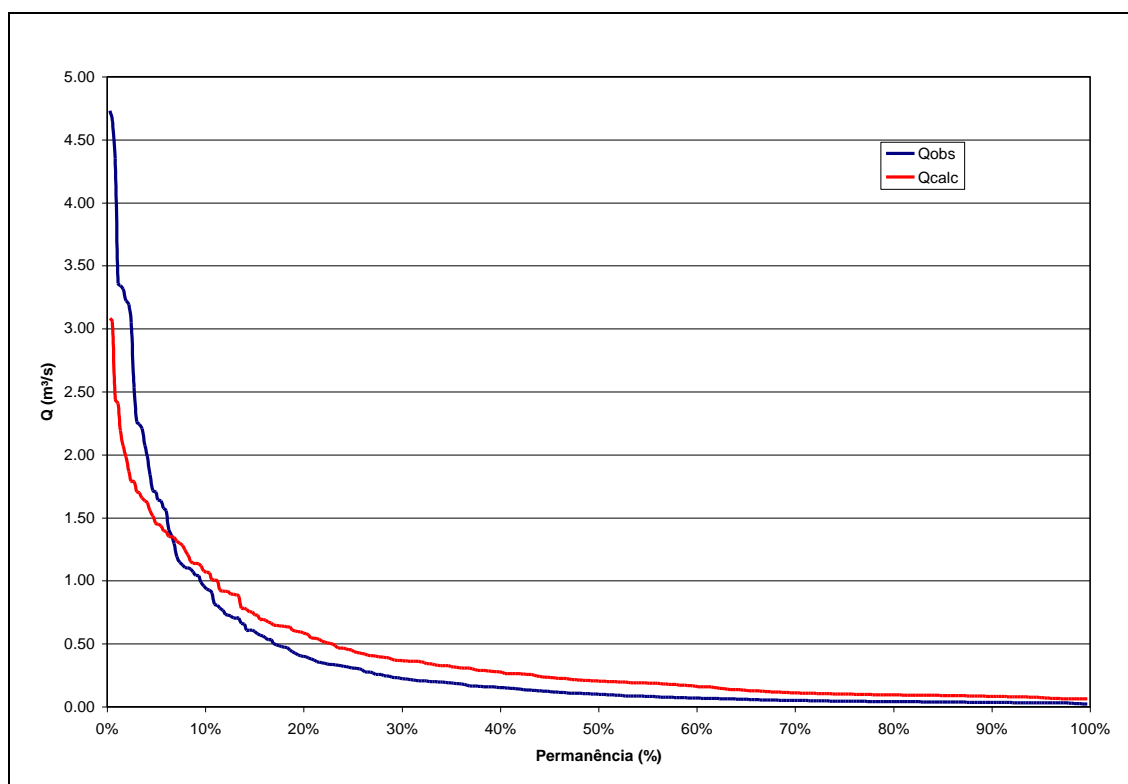


GRÁFICO 2 – Curva de Permanência - Bacia Rincão do Soturno - Dados Diários

No Gráfico 3 tem-se a vazão observada x vazão calculada para a Bacia Rincão do Soturno, com o propósito de ilustrar melhor a simulação diária, constatando-se uma grande dispersão entre os valores.

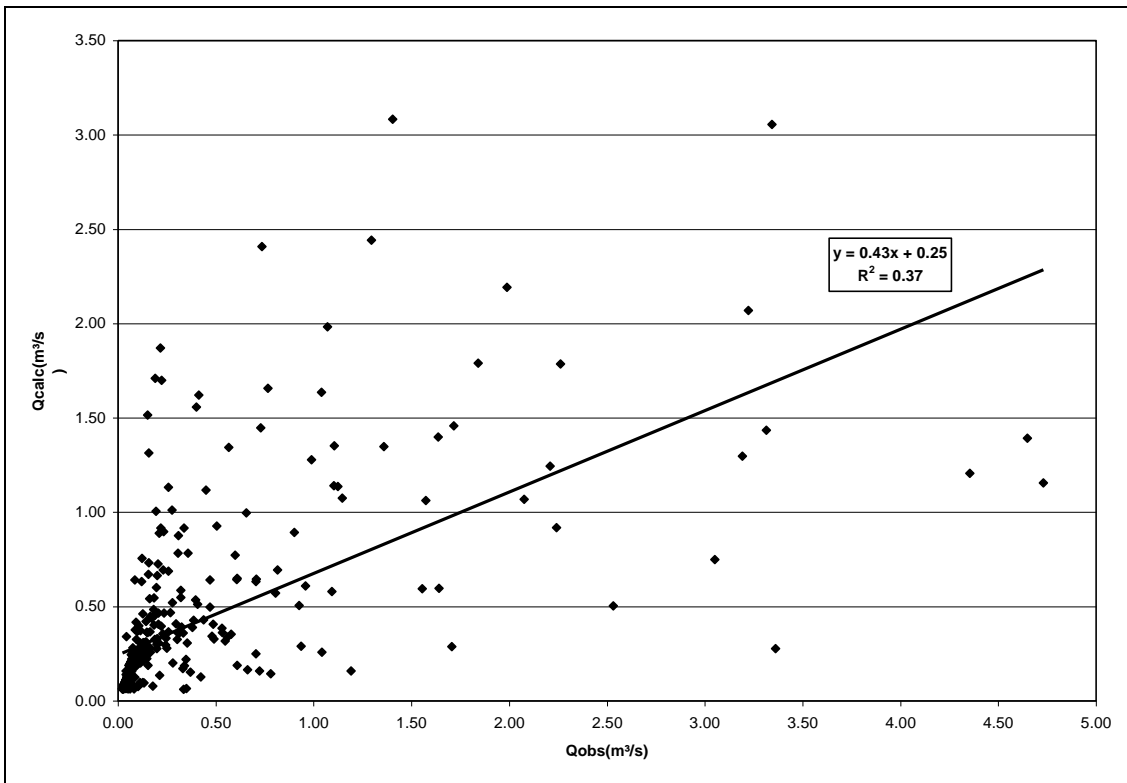


GRÁFICO 3 – Vazão Observada x Vazão Calculada - Bacia Rincão do Soturno - Dados Diários

Nos Gráficos 4 e 5 são mostrados os hidrogramas com os dados observados e simulados, para o período de verificação do modelo SWAT em escala diária.

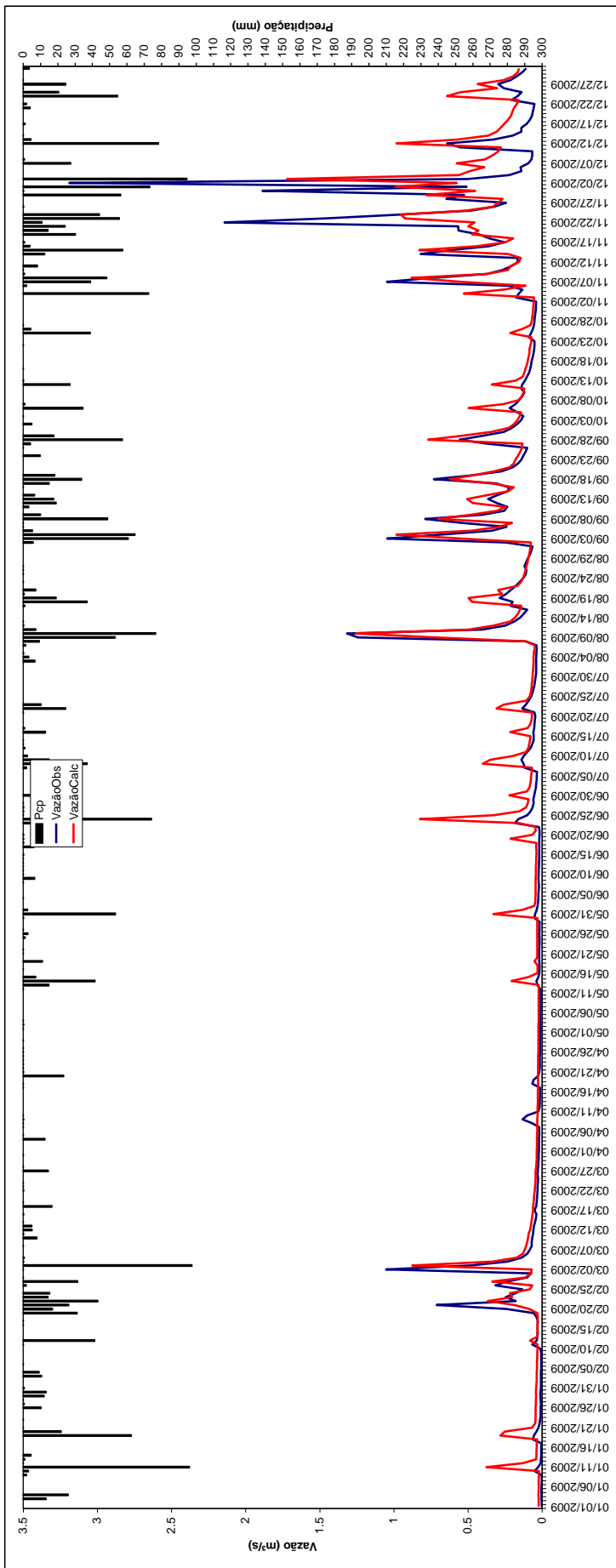


GRÁFICO 4 – Vazão Diária - Bacia Rancho do Amaral – Verificação

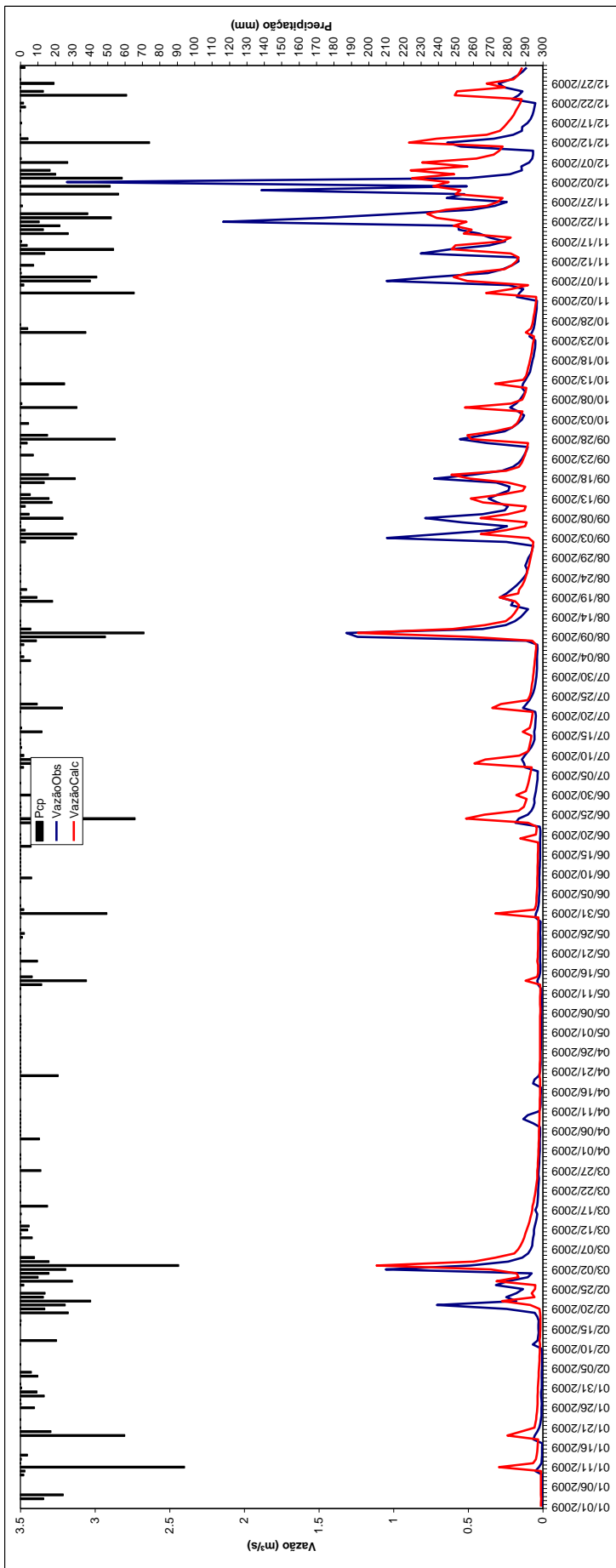


GRÁFICO 5 – Vazão Diária - Bacia Rincão do Soturno – Exutório do Rancho do Amaral – Verificação

Observa-se no hidrograma vazão observada e calculada dos pontos correspondentes ao exutório da Bacia Rancho do Amaral em escala diária no período de verificação, a similaridade entre os gráficos refletindo o bom desempenho da verificação para o período diário.

Nos Gráficos 6 a 8 são apresentados os hidrogramas com os dados observados e simulados, para o período de calibração do modelo SWAT na Bacia Rincão do Soturno em escala mensal.

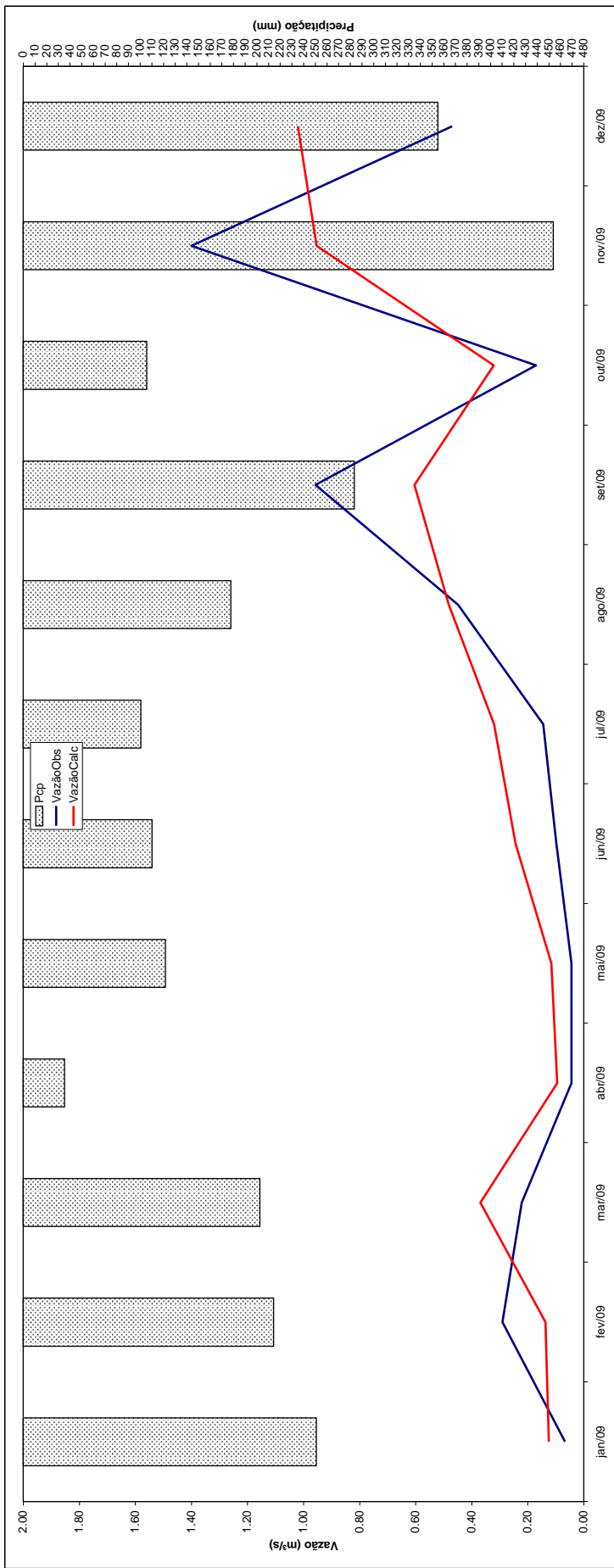


GRÁFICO 6 – Vazão Mensal - Bacia Rincão do Soturno – Calibração

Analisando-se o hidrograma vazão observada e calculada da Bacia Rincão do Soturno em escala mensal, observa-se uma maior correlação entre os valores mínimos (escoamento de base) e máximos (picos), o modelo reproduziu a distribuição e tendência das concentrações observadas e como consequência a simulação mensal foi mais satisfatória do que a diária. No Gráfico 7, temos a curva de permanência e no Gráfico 8, a vazão observada x vazão calculada para a Bacia Rincão do Soturno, com o propósito de ilustrar melhor a simulação mensal.

No Gráfico 7 é apresentada a curva de permanência das vazões mensais observadas e calculadas, onde se observa que em torno de 15% ocorre a interseção das duas curvas, o mesmo encontro se observa na curva de permanência das vazões diárias observadas e calculadas. Pode-se inferir que o modelo subestimou as vazões de pico e superestimou as vazões com permanência maior que 15%, o que pode se justificar pelo tamanho da bacia, relevo montanhoso e as características da relação rio – aquífero, com leito rochoso, que contribuem para incertezas nos resultados das medições das baixas vazões. De acordo com Oppa et al. (2008) que analisou os erros de medição de vazão e efeitos na curva-chave da bacia em estudo, rios de montanha apresentam singularidades de escoamento sub-superficial e leito rochoso, o que prejudica a medição de vazão e, conseqüentemente a construção da curva-chave em vazões baixas. Outro fator que contribui para erros nos dados monitorados é a construção de estruturas de barramento executadas pela população ribeirinha do local.

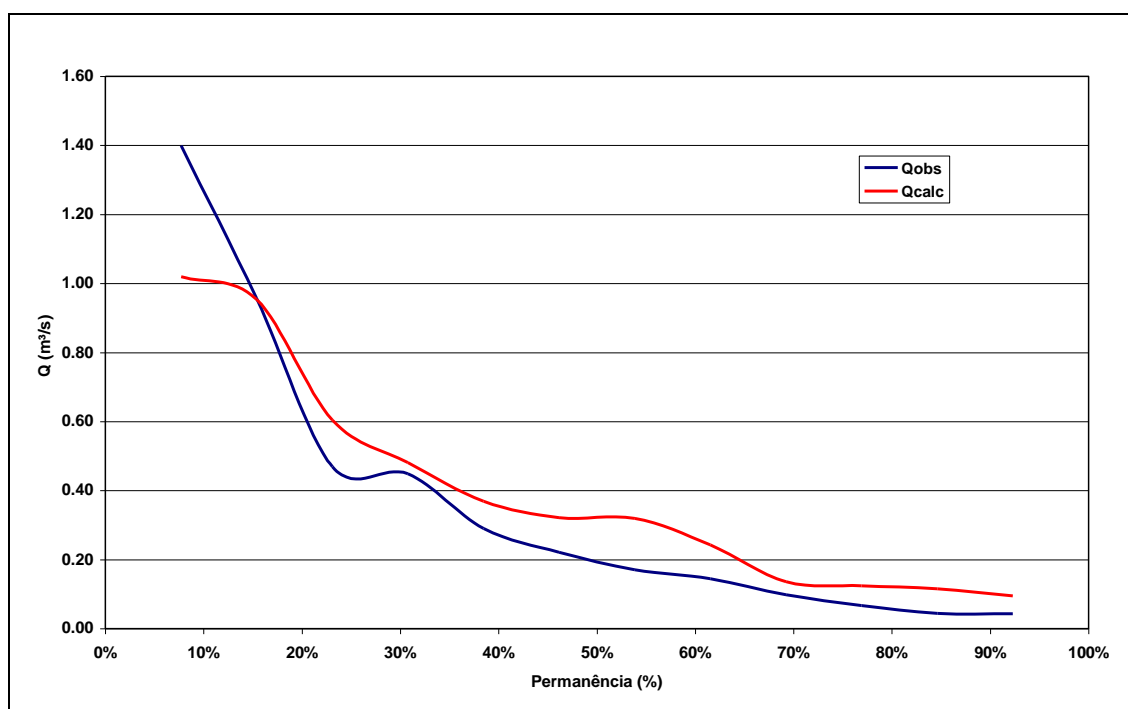


GRÁFICO 7 – Curva de Permanência - Bacia Rincão do Soturno - Dados Mensais

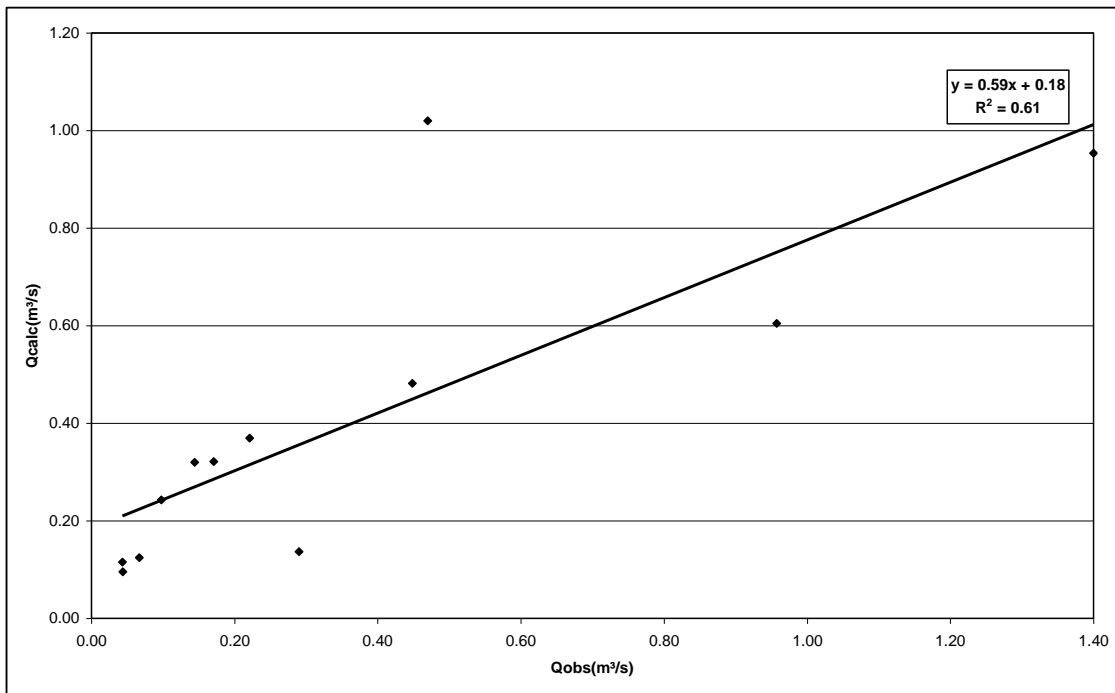


GRÁFICO 8 – Vazão Observada x Vazão Calculada - Bacia Rincão do Soturno - Dados Mensais

Nos Gráficos 9 e 10 são exibidos os hidrogramas com os dados observados e simulados, para o período de verificação do modelo SWAT em escala mensal.

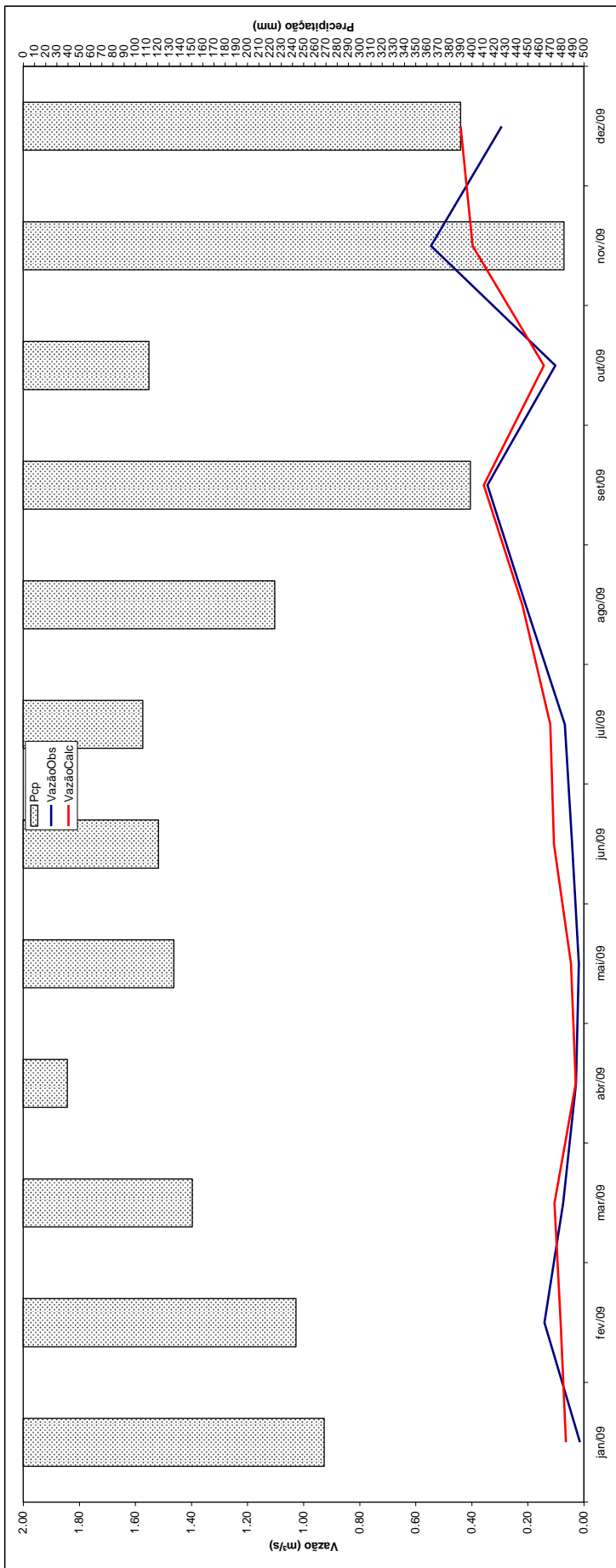


GRÁFICO 9 – Vazão Mensal - Bacia Rancho do Amaral - Verificação

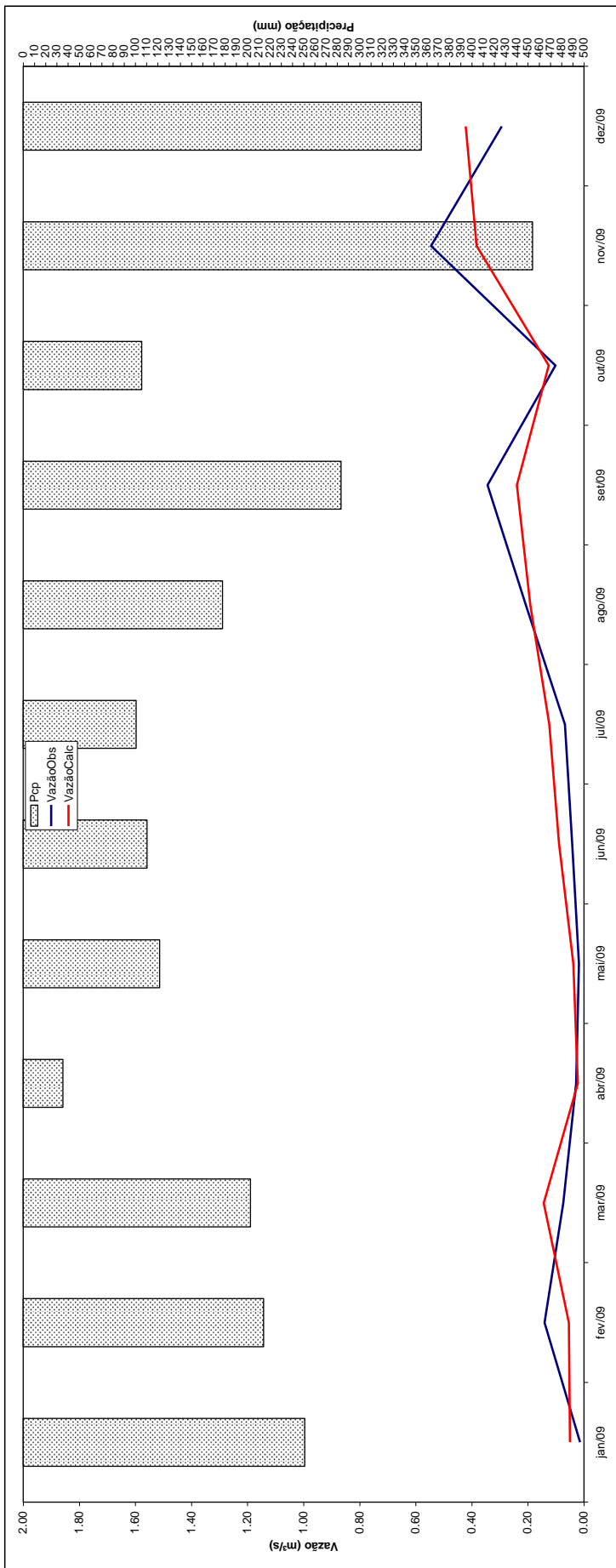


GRÁFICO 10 – Vazão Mensal - Bacia Rincão do Soturno – Exutório do Rancho do Amaral – Verificação

Observa-se no hidrograma vazão observada e vazão calculada dos pontos correspondentes ao exutório da Bacia Rancho do Amaral em escala mensal no período de verificação, a equivalência entre os gráficos refletindo o bom desempenho da verificação para o período mensal.

4.2. Cenários Climáticos Futuros

Os cenários climáticos futuros gerados para a bacia Rincão do Soturno, no período de 2071 a 2100, são descritos abaixo:

- **Cenário A2:** reflete a alta emissão de gases de efeito estufa, sendo considerado pessimista.
- **Cenário B2:** reflete a baixa emissão de gases de efeito estufa, sendo considerado otimista.

A Tabela 9 mostra a diferença entre os dados climáticos diários de entrada dos cenários A2 e B2 simulados, e dos dados monitorados para a bacia Rincão do Soturno.

TABELA 9 – Dados Climáticos Diários de Entrada

Cenário	PCP_{MED}	PCP_{MAX}	PCP_{MIN}	T_{MED}	T_{MAX}	T_{MIN}
A2 (Período: 2071 a 2100)	6,05	250,00	0,00	21,86	45,51	-0,61
B2 (Período: 2071 a 2100)	6,00	189,00	0,00	20,92	44,71	-1,47
Dados monitorados (Período: 09/06/2008 a 31/12/2009)	6,21	94,28	0,00	-	39,20	-2,20

NOTA: Onde: PCP_{MED}: precipitação média (mm); PCP_{MAX}: precipitação máxima (mm); PCP_{MIN}: precipitação mínima (mm); T_{MED}: temperatura média (°C); T_{MAX}: temperatura máxima (°C); T_{MIN}: temperatura mínima (°C).

Os valores de vazão simulados pelo modelo SWAT para os cenários futuros A2 e B2, no período de 2071 a 2100, estão na Tabela 10.

TABELA 10 – Vazões Calculadas Diárias

Cenário	Q_{CALC_MED}	Q_{CALC_MAX}	Q_{CALC_MIN}
A2 (Período: 2071 a 2100)	0,74	28,22	0,00
B2 (Período: 2071 a 2100)	0,73	20,34	0,00
Dados monitorados (Período: 09/06/2008 a 31/12/2009)	0,37	4,73	0,02

NOTA: Onde: Q_{CALC_TOTAL}: vazão calculada total (m³/s); Q_{CALC_MED}: vazão calculada média (m³/s); Q_{CALC_MAX}: vazão calculada máxima (m³/s); Q_{CALC_MIN}: vazão calculada mínima (m³/s);

A precipitação média apresentou pouca variação entre os cenários futuros simulados A2 e B2 e os dados monitorados, o mesmo não ocorrendo para os dados de precipitação máxima. A temperatura média, máxima e mínima apresenta uma variação aproximada de 1°C entre os cenários citados. Observa-se que o cenário B2, considerado otimista, é o que mais se aproxima dos valores dos dados monitorados para a temperatura do ar máxima (°C) e mínima (°C). Entre as vazões calculadas máximas existe uma grande variação entre os cenários, já para a vazão calculada média, a diferença é mais acentuada entre os cenários futuros A2 e B2 e a obtida para os dados monitorados. O cenário A2 considerado pessimista apresentou valores mais extremos tanto para vazão calculada como para os dados de entrada.

Perazzoli (2012) aplicou o modelo SWAT para analisar os impactos gerados pelas mudanças climáticas e pelo uso do solo, no regime das vazões e produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia, SC, obtendo valores maiores de vazão para o cenário A2, considerado pessimista.

Nos Gráficos 11 a 13 são apresentados os hidrogramas com os dados de vazões anuais simulados, para os cenários A2 e B2, no período de 30 anos na Bacia Rincão do Soturno.

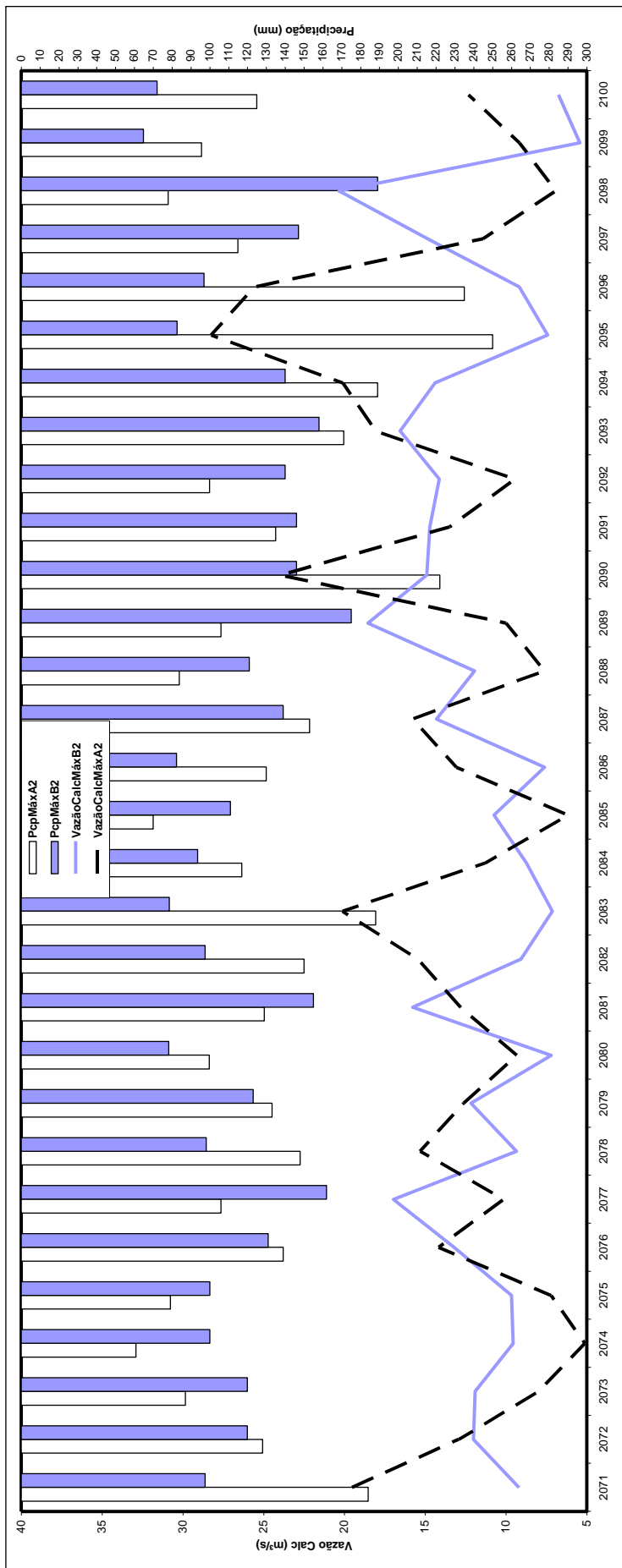


GRÁFICO 11 – Vazões Anuais Máximas para os Cenários A2 e B2 - Bacia Rincão do Soturno

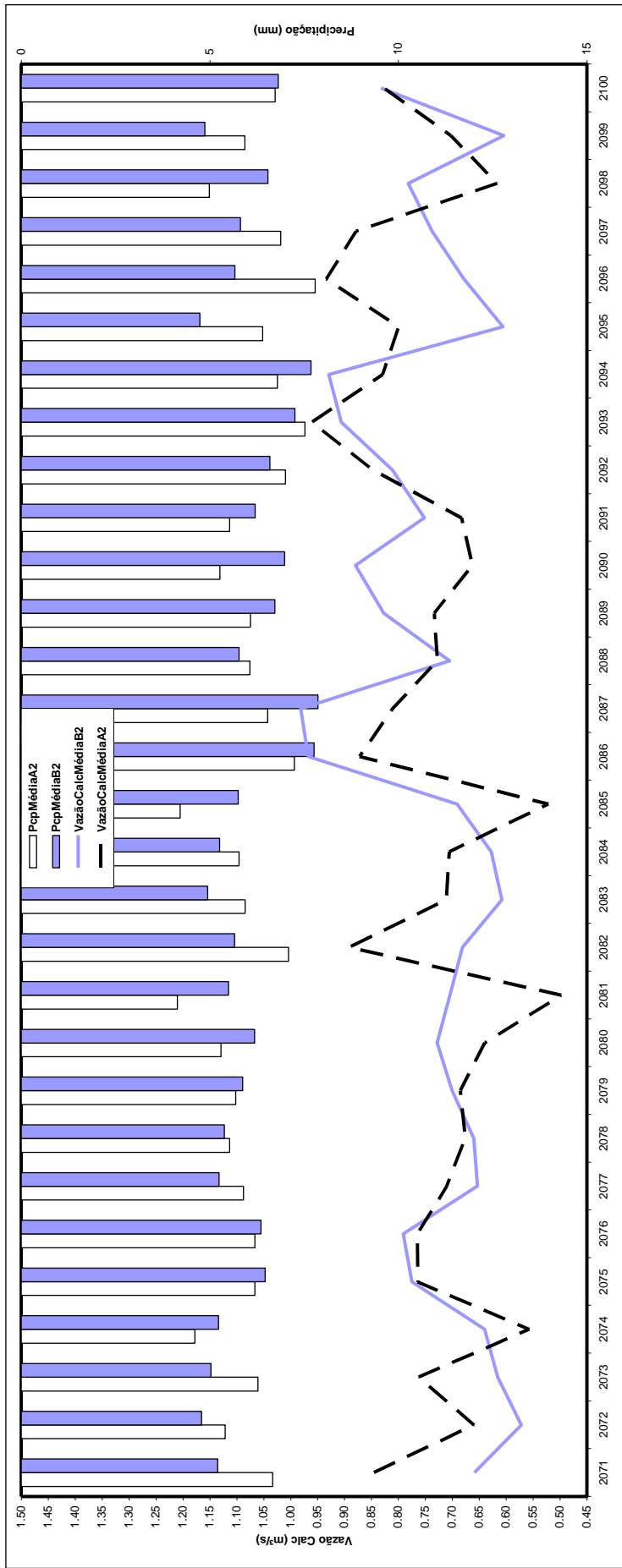


GRÁFICO 12 – Vazões Anuais Médias para os Cenários A2 e B2 - Bacia Rincão do Soturno

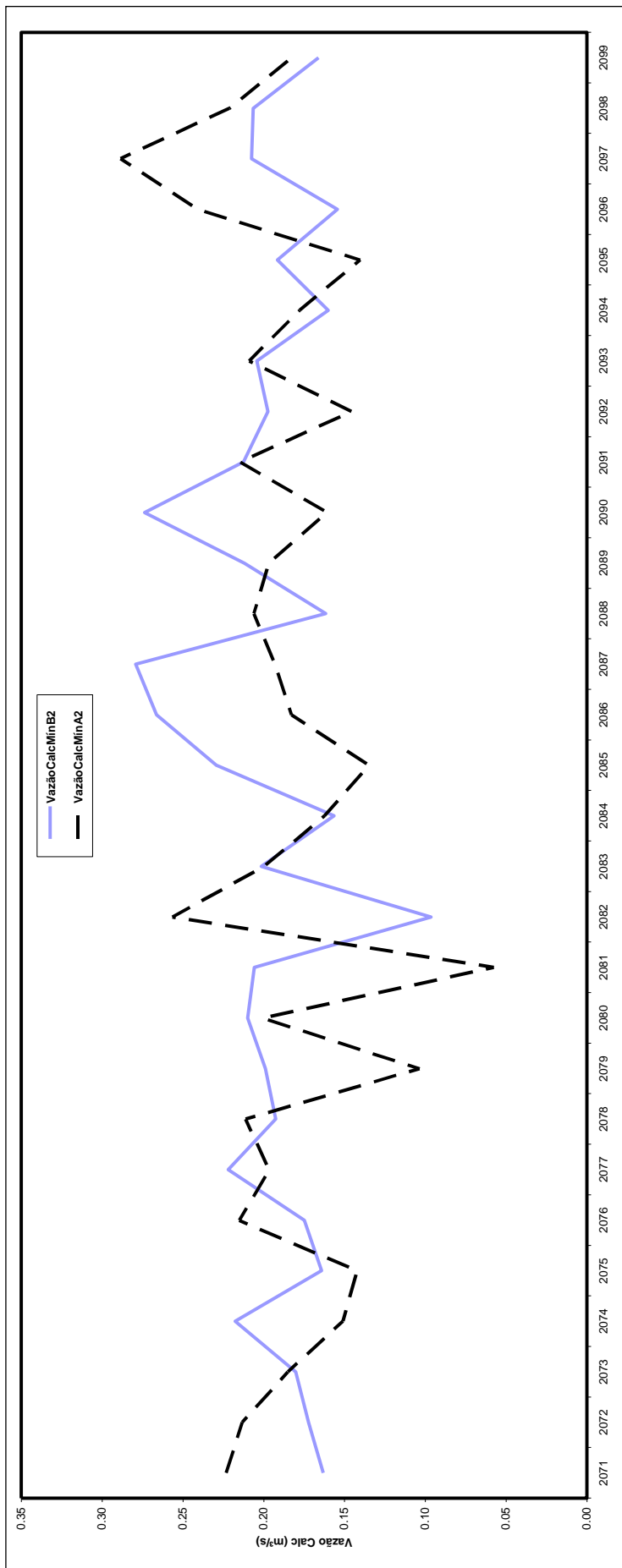


GRÁFICO 13 – Vazões Anuais Mínimas para os Cenários A2 e B2 - Bacia Rincão do Soturno

No Gráfico 11 observa-se que o cenário A2 apresenta picos maiores para a vazão anual máxima, enquanto que o cenário B2 apresenta maior quantidade de picos.

No Gráfico 12 nota-se um equilíbrio entre os valores de vazão anual média para os cenários A2 e B2, apesar dos picos do cenário B2 estar atrasado em relação aos do cenário A2.

No Gráfico 13 verifica-se que o cenário B2 apresenta valores maiores para a vazão anual mínima e maior quantidade de picos em relação ao cenário A2.

Segundo Krol e Bronstert e Mello et al. (2007 e 2008 apud PERAZZOLI, 2012, p. 60), estudos indicam que a amplitude e a frequência de vazões máximas tendem a aumentar na maioria das regiões do planeta, e que as vazões mínimas tendem a diminuir.

No Gráfico 14 são expostas as curvas de permanência das precipitações diárias para os cenários A2 e B2.

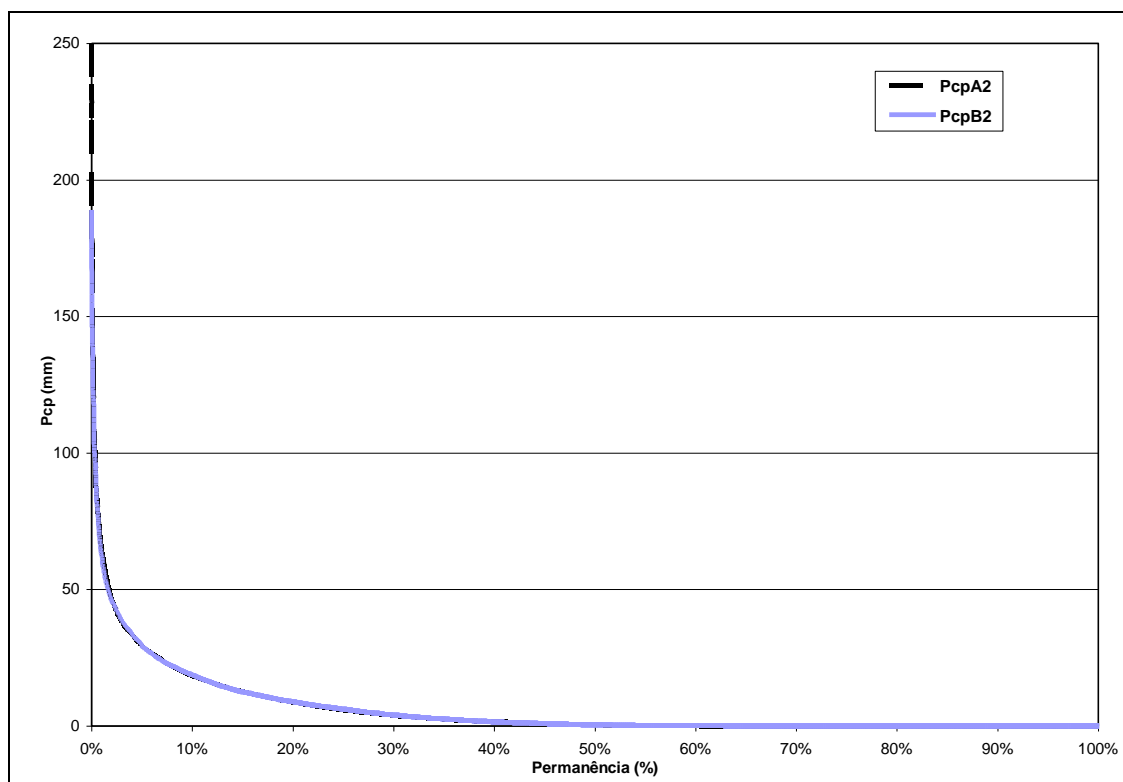


GRÁFICO 14 – Curva de Permanência das Precipitações para os Cenários A2 e B2 - Dados Diários

No Gráfico 14 observa-se que o cenário A2 apresenta valores crescentes para a precipitação, superiores aos valores do cenário B2. Os resultados encontrados para as curvas de permanência das precipitações diárias coincidem com os valores obtidos por Perazzoli

(2012), o que é coerente, pois o mesmo modelo foi aplicado em uma bacia com características semelhantes na região sul do Brasil.

O aumento da precipitação gerado por mudanças climáticas disponibiliza maior quantidade de água para determinadas regiões, porém quando este aumento decorre de tempestades, origina enchentes que causam mais danos do que benefícios. O aumento da temperatura provoca aumento da evaporação das águas de superfície e reservatórios, conduzindo à perda de água doce contida nas geleiras. De acordo com Marengo et al. (2011), em estudo que avalia as mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil, com cenários futuros, a frequência e a intensidade de eventos de chuva extremas no Sul e Sudeste do Brasil tendem a aumentar. As mudanças climáticas configuram risco a disponibilidade de água e aos sistemas de gestão dos recursos hídricos.

5. CONCLUSÃO

O modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) apresentou bons resultados, tanto na calibração quanto na verificação, evidenciando uma representação física adequada para a bacia hidrográfica do Rincão do Soturno – Santa Maria/RS, exceto para a escala temporal diária. A bacia Rincão do Soturno apresenta tempo de concentração de 150 minutos, que relacionado com a discretização diária da chuva compromete a simulação diária, conforme pôde ser observado pelo NSE de 0,36. O pequeno período de dados e a necessidade de maiores informações sobre a caracterização física do solo, clima e vegetação também são fatores determinantes para os valores de ajuste obtidos na calibração diária. Observa-se que quanto maior a escala, melhor o ajuste. Além disso, o modelo SWAT é complexo e faltam informações para parâmetros importantes, o que dificulta o processo de calibração.

O modelo, no entanto, mostrou-se satisfatório para as simulações dos cenários propostos. Para os cenários futuros simulados, observa-se uma pequena redução na disponibilidade hídrica da bacia, além de um aumento nas temperaturas máxima e mínima. As vazões máximas simuladas apresentaram valores mais acentuados, indicando a possibilidade de ocorrência de enchentes.

As incertezas que cercam as mudanças climáticas exigem maior conhecimento da disponibilidade de água e dos sistemas de gestão dos recursos hídricos, fazendo-se necessário determinar e conhecer os valores quantitativos e qualitativos dos mesmos, a fim de reduzir os impactos ambientais gerados pelas ações antrópicas.

6. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se expandir os dados de aquecimento do modelo SWAT, assim como o período de calibração, para se obter uma melhor representação dos escoamentos superficiais e vazões líquidas. Estudos mais detalhados da evapotranspiração, infiltração, percolação e percolação profunda agregariam grandes benefícios à aplicabilidade do modelo, assim como para uma resposta hidrológica mais fidedigna da bacia, auxiliando no planejamento e gestão dos recursos hídricos da região em que a mesma está inserida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SLAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95 f. 2008.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M.; MUTTL4H, R.; BERNHARDT, G. Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. *Ground Water*, v. 33, n.6, p. 1010-1018. 1995.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, n.2, p. 411-424. 1999.

ARNOLD, J.G.; MUTTIAH, R.S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P.M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, v.227, p.21-40, 2000.

AZOLIN, M. A. D; MUTTI, L. S. M. Solos da Bacia do Vacacaí-Mirim. Relatório Técnico (não publicado). 20 f. Porto Alegre, 1988.

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BERTONI J. C.; TUCCI, E. M. C. “Precipitação”. In: TUCCI, E.M.C.; *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS: ABRH, 2001. n.177, p. 180-182.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. *Introdução à Engenharia Ambiental*. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 305 f.

BRASIL. Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regula o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/19433.htm. Acesso em: 29 jun. 2013.

BONUMÁ, N. B. Modeling of Water, Sediment and Phosphorus Loads in an Agricultural Watershed in Southern Brazil. 2011. 125 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

BURIOL, G. A. et al. Homogeneidade e Estatísticas Descritivas dos Totais Mensais e Anuais de Chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, v. 11, n. 4, p. 89-97, Out/Dez 2006. 9 f.

CAMPANA, N. A. Sistemas de Informações em Recursos Hídricos. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 1997, Vitória - ES. Anais...Vitória - ES: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.

CASAGRANDE, L. Avaliação do parâmetro de propagação de sedimentos do modelo de Williams (1975) na Bacia do rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2004. 150 f.

CIBIN, R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. Hydrological Processes, v. 24. p. 1133-1148, 2010.

DIAS, J. R. Aplicação do modelo hidrológico AGNPS2001 utilizando dados observados na Bacia do Arroio Vacacaí Mirim. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003. 120 f.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação dos solos. Embrapa, Brasília. 1999. 412 f.

ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F. M.; BERLATO, M. A.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. Revista do Centro de Ciências Rurais, 1990, UFSM, 20 (3-4), p. 203-218.

FELTRIN, R. M. Comportamento das variáveis Hidrológicas do balanço hídrico do solo em lisímetros de drenagem. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

GARBOSSA, L. H. P.; BLAINSKI, E.; JUSTEN, J. G. K.; VASCONCELOS, L. R. Potencial de Uso de Modelo Hidrológico de Base Física na Avaliação da Legislação Florestal e seus Impactos nos Cenários Hidrológicos. In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza – CE. Brasil. 2010. Disponível em: <

http://intranetdoc.epagri.sc.gov.br/producao_tecnico_cientifica/DOC_404.pdf>. Acesso em: 17 mai 2013.

GENOVEZ, A. M. Vazões máximas. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Organizadores). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. p.33-112.

GIBERTONI, R. F. C.; SANTOS, I.; MÜLLER, I. I.; PEREIRA, P. S. Modelagem da produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas do litoral paranaense: o caso da bacia do rio Nhundiaquara. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – Mato Grosso do Sul. Brasil. 2009. Disponível em: <[http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Gibertoni_\(2009\)_Modelagem_da_producao_e_transporte.pdf](http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Gibertoni_(2009)_Modelagem_da_producao_e_transporte.pdf)>. Acesso em: 15 abril 2013.

GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrográficas: conceitos básicos. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Organizadores). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. p.3-13.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. 2009. Ciência & Ambiente. In: O Clima de Santa Maria. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria: UFSM, jul. 1990. v. 1.

LENCASTRE, A. & FRANCO, F. M. Lições de hidrologia. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 1984. 449 f.

LOPES, N. H. Y. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LOPES, N. H. Y. and KOBAYAMA, M. 2008a. Análise do equilíbrio hidrossedimentológico em uma microbacia experimental com o modelo SWAT e as características geomorfológicas. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia. Belo Horizonte – Minas Gerais, 2008. Brasil. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/artigo%20SBEA2008%20%28Lopes%20et%20al%29.pdf>>. Acesso em: 19 março 2013.

LUBITZ, E. Avaliação da Aplicação do Modelo Hidrológico Swat à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC.2009. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2009.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MARCON, I. R.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; BELING, F. A.; HEATWOLE, C. D. Evaluation of the Swat Model in a Small Watershed Representative of the Atlantic Forest Biome in Southern Brazil. In: AGU FALL Meeting 2011, San Francisco - California, USA, 2011. Disponível em: < <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011AGUFM.H11B1056M>>. Acesso em: 19 jan. 2012.

MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. Mudanças Climáticas, Condições Meteorológicas Extremas e Eventos Climáticos no Brasil. In: Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. (s/d), 2011. Disponível em: < www.fbds.org.br/cop15/FBDS_mudancasclimaticas.pdf>. Acesso em: 29 Abr. 2013.

MARTINS, E. S. P. R. & PAIVA, J. B. D. de. Quantidade dos recursos hídricos. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Organizadores). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. v. 1, p. 531-566.

MARTINS, J. A. Escoamento superficial. In: PINTO, N. L. S. et al. Hidrologia Básica. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 278 f.

MEDIONDO, E. M., TUCCI, C. E. M. (1997). Escalas Hidrológicas. I. Conceitos. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. v. 2, n. 1, p. 59-79, jan/jun.

MEIRA NETO, A. A.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. Aplicabilidade do Modelo SWAT a Um Sistema Hidrológico Complexo de Clima Semi-Árido. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió – AL, Brasil, 2011, 15 p. Disponível em: < http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/8bdbed7821e6e982bf51367a74194826_516a562971bfee883e299245f6f6bedf.pdf>. Acesso em: 09 maio 2013.

MENDONÇA, A. S. Razões para a quantificação In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Organizadores). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. p.9-10.

MINOTI, R. T. Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Micro-Bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior. 2006. 247 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura. 1961.42 f.

MORO, M. A utilização da interface SWAT – SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICES. National Engineering Handbook. Michigan, EUA, Department of Agriculture, 2007.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. & KING, K.W. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation - Version 2009. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, EUA, 2009. TWRI Report TR-191. 530 f.

OLIVEIRA, M. Q. C. Impacto de Mudanças no Uso do Solo nas Características Hidrossedimentológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Joanes e Sua Repercussão na Zona COSTEIRA. 1999. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.

OPPA, L. Utilização de Modelo Matemático de Qualidade da Água para Análise de Alternativas de Enquadramento do Rio Vacacaí Mirim. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

OPPA, L.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; MARCON, I. R. Erros na Medição de Vazão – Efeitos na Curva Chave. In: XXXI Congresso Interamericano AIDIS, Santiago, CHILE, 2008, 14 p. Disponível em: < http://200.144.189.97/phd/LeArq.aspx?id_arq=5559>. Acesso em: 15 nov. 2012.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Rede de Monitoramento Hidrológico. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Organizadores). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. cap. 17, p. 492-493.

PAIVA, R. C. D.; PAIVA, E. M. C. D. Aplicação do modelo de simulação hidrológica SWAT em pequena bacia no sul do Brasil. In: Anais do XXII Congresso LatinoAmericano de Hidráulica, Ciudad Guayana. Venezuela, 2006a. 9 f.

PAIVA, R. C. D.; PAIVA, E. M. C. D. Simulação hidrológica com modelo SWAT na bacia Menino Deus I, representativa da Mata Atlântica. In: Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Curitiba-PR, 2006b. 12 f.

PERAZZOLI, M. Avaliação das Mudanças Climáticas e do Uso do Solo nas Vazões e nos Sedimentos da Bacia do Ribeirão Concórdia, Lontras – SC. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2012.

PEREIRA, M. A. F. Processos Hidrossedimentológicos em Diferentes Escalas Espaço Temporais no Bioma Mata Atlântica. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PRECIS – Regional Climate Modelling System. Disponível em: <<http://www.metoffice.gov.uk/precis/>>. Acesso em: 09 dez. 2012.

RAUDKIVI, A. J. Hydrology: an advanced introduction to hydrological processes and modelling. Oxford; New York; Pergamon Press, 1979. cap. 11 – p. 347-381.

ROCHA, C. H. B. Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar. Juiz de Fora: Ed. do Autor, 2000. 220 f.

SALLES, L. A. Calibração e Validação do Modelo SWAT para a Predição de Vazões na Bacia do Ribeirão Pípiripau. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2012.

SARI, V. Interceptação da Chuva em Diferentes Formações Florestais na Região de Santa Maria - RS. 2011. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SARMENTO, L. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - Universidade de Brasília/Distrito Federal. 241 f. 2010.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica. In: Tucci (Organizador). Hidrologia – Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Ed. da Universidade, 1997. cap. 2, p. 35.

SINGH, V. P. (editor) (1995). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States.

SRINIVASAN, R..; RAMANARAYANAN, T.S.; ARNOLD, J.G.; BEDNARZ, S.T. Large area hydrologic modeling and assessment Part II: Model Application. American Water Resources Association, v.34, n. 01, p. 91-101. 1998.

SOUZA, R. M. Estimativa de Vazões Mínimas na Bacia do Altíssimo Rio Negro, Região Sul-Brasileira, com Aplicação do Modelo Swat. Paraná. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Terra) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SPRUIILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers), v.43, p.1431-1439, 2000.

THOMAS, D. L.; EVANS, R. O.; SHIRMOHAMMADI, A.; ENGEL, B. A., Agricultural Non-Point Source Water Quality Models: Their Use and Application. ASAE Annual International Meeting, Orlando, Florida, USA, 12-16, July 1998. 8 f. Disponível em: < <http://www3.bae.ncsu.edu/s273/ModelProj/thomas98.pdf> >. Acesso em: 15 março 2011.

TUCCI, C.E.M. Impactos da variabilidade climática sobre os recursos hídricos do Brasil. Brasília, ANA, 2002. 70 f.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH, 2005. 678 f.

TUCCI, C. E. M. Simulação no gerenciamento de recursos hídricos. In: BARTH, F.T. et al. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel, ABRH, 1987. Cap. 3.

USDA SOIL CONSERVATION SERVICE. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, chapters 4-10, 1972.

VEITH, T. L.; LIEW, M. W. VAN; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), v.53, p.1477-1486, 2010.

VIEUX, B. E. Distributed hydrologic modeling using GIS. 2.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 289 f.

VILLELA, S. M. & MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 6 f.

ZANETTI, S. S. Modelagem Hidrológica em Microbacia Hidrográfica da Bacia do Rio Paraíba do Sul. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro. 2007.