

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Tássia Mattos Brighenti

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DE
DIFERENTES MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA O
MODELO SWAT.**

Florianópolis, 2015

TÁSSIA MATTOS BRIGHENTI

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DE
DIFERENTES MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA O
MODELO SWAT**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Nadia Bernardi Bonumá.

Florianópolis, 2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Brighenti, Tássia Mattos
MODELAGEM HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS
DE CALIBRAÇÃO PARA O MODELO SWAT / Tássia Mattos
Brighenti ; orientadora, Nadia Bernardi Bonumá -
Florianópolis, SC, 2015.
116 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. análise de sensibilidade.
3. validação. 4. bacia hidrográfica do Rio Negrinho. I.
Bonumá, Nadia Bernardi. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.
III. Título.

Tássia Mattos Brighenti


**MODELAGEM HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DE
DIFERENTES MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA O
MODELO SWAT.**

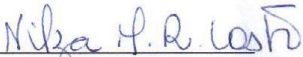
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “**Mestre em Engenharia Ambiental**”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Florianópolis, 24 de março de 2015.



Prof. William Gerson Matias, Dr.
(Coordenador)

Banca Examinadora:


Prof.ª Nadia Bernardi Bonumá, Dr.ª
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof.ª Nilza Maria dos Reis Castro, Dr.ª
Universidade Federal do Rio Grande do Sul


Prof. Pedro Luiz Borges Chaffé, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Fábio Farias Pereira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À Nadia Bernardi Bonumá, sou muito grata por sua orientação e incentivos, por sua paciência e valiosa amizade.

Agradeço a todos os amigos que fiz nestes anos de LabHidro, pelos momentos de aprendizagem e amizade.

Aos membros da banca Nilza Maria dos Reis Castro, Fábio Farias Pereira e principalmente ao Professor Pedro Luiz Borges Chaffe que além das valiosas correções fez parte da ideia inicial deste projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo auxílio financeiro.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Federal de Santa Catarina, pela atenção e assistência.

Ao Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) de Rio Negrinho pelo auxílio.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) pelo fornecimento dos dados meteorológicos da região de Rio Negrinho.

As amigas de uma vida, perto ou longe vocês sempre serão indispensáveis na minha caminhada.

Por fim, a minha família, por todo apoio e confiança que tive desde o início.

Muito Obrigada!

“The important thing in science is not so much to obtain new facts as to discover a new ways to think about them.”

(Sir Willian Lawrence Bragg)

RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados pela modelagem hidrológica é a calibração eficiente dos parâmetros do modelo. O objetivo deste estudo foi testar métodos de calibração hierárquicos para o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) considerando variações da bacia. A área de estudo foi a bacia hidrográfica do Rio Negrinho, localizada no estado de Santa Catarina, com uma área de 198,5 km². Antes da primeira simulação os dados de entrada foram pré-processados: os dados de chuva (1999-2012) foram interpolados pelo método da Krigagem Simples com Diferentes Médias Locais e Elevação como Variável Externa, e um filtro automático foi usado para separar o escoamento superficial e de base a partir da vazão medida. Uma análise de sensibilidade dos parâmetros foi realizada e do total, 15 parâmetros foram selecionados. A calibração do modelo foi feita usando o algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2), utilizando testes de crescente complexidade. A série de vazões observadas foi dividida em períodos distintos de calibração e validação (*Split Sample Test*) sendo que os resultados obtidos para o intervalo mensal foram considerados aceitáveis com um coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NSE) $\geq 0,5$ e $P_{bias} \leq \pm 25\%$. Na análise de cada ano separadamente (*Differential Split-Sample Test*) a calibração e validação dos anos úmidos (2008 a 2012) foi mais eficiente que dos anos secos (2003 a 2007). No processo de validação do modelo para uma bacia com uso do solo semelhante (*Proxy-Catchment Test*), o modelo não foi eficiente para o ajuste dos picos de vazões (NSE de 0), porém, houve uma compensação dos volumes na estimativa do balanço hídrico (P_{bias} de 0,1%). Os resultados indicam que a eficiência do modelo SWAT depende da quantidade de dados disponíveis e do período de calibração. Para simulação de cenários climáticos e de mudanças de uso do solo o modelo deve ser calibrado e validado usando dados espacialmente bem distribuídos e uma série de vazões suficientemente representativa que considere períodos secos e úmidos.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade; validação; bacia hidrográfica do Rio Negrinho.

ABSTRACT

One of the main challenges facing hydrological modeling is the effective calibration of model parameters. The aim of this study was exemplified a calibration scheme for the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) model by considering land use and climate changes. The study area was the Rio Negrinho watershed (198,5 km²), located in Santa Catarina State, Brazil. Before the first simulation, input data were preprocessed: rainfall data (1999 to 2012) were interpolated using Simple Kriging with Varying Local Means with Elevation as External variable, and an automated digital filter technique was used to separate baseflow from the measured streamflow. A parameter sensitivity analysis was carried out and 15 parameters were selected. Model calibration was performed with the *Sequential Uncertainty Fitting* (SUF12) Algorithm through increasing complexity tests. The measured flow series was first divided into calibration and validation periods (*Split Sample Test*) wherein the predicted monthly flow matched the measured values, with a Nash–Sutcliffe coefficient (NSE) ≥ 0.5 and Pbias $< \pm 25\%$. When wet and dry periods were considered separately (*Differential Split-Sample Test*) the NSE values of wet years (2008 a 2012) were higher than dry years values (2003 a 2007). In the SWAT validation for a watershed with similar land use (*Proxy-Catchment Test*), the model could not capture the flow peaks well (NSE of 0), however, the water balance volumes were compensated (Pbias of 0.1%). The case study demonstrates that SWAT performance vary largely, depending on the spatial scale and calibration period. SWAT model can be used in further studies to simulate land use and climate change scenarios however it must be calibrated and validated using data spatially well distributed and recorded series segment including dry and wet periods.

Keywords: Sensitivity analysis; validation; Rio Negrinho basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demonstração dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. Fonte: Apostila de Hidrometria, Kobiyama, et al. (2011).	27
Figura 2 - Fluxograma demonstrativo dos procedimentos realizados neste estudo.	39
Figura 3 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Negrinho, Santa Catarina.	40
Figura 4 - Localização espacial das estações de monitoramento na bacia hidrográfica do Rio Negrinho.	42
Figura 5 - Corte transversal do exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho e localização dos equipamentos de monitoramento.	43
Figura 6 – Equipamentos utilizados para monitoramento no exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho. a) turbidímetro; b) <i>datalogger</i> ; c) pluviógrafo; d) sensor de nível.	43
Figura 7 – Modelo Numérico do Terreno e rede de drenagem para bacia hidrográfica do Rio Negrinho.	44
Figura 8 – Uso e ocupação do solo para bacia hidrográfica do Rio Negrinho.	45
Figura 9 – Tipo de solo referente à bacia hidrográfica do Rio Negrinho. ...	47
Figura 10 – Fluxograma do processo de interpolação realizado pelo PCP SWAT. Fonte: Adaptado de Zhang e Srinivasan (2009).	48
Figura 11 – Forma gráfica da curva-chave para o ponto Rio Negrinho Montante (a) e para o exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho (b). Onde o eixo <i>x</i> são os valores observados e vazão (m ³ /s) e o eixo <i>y</i> as cotas (cm).	51
Figura 12 – Delimitação das sub-bacias e HRUs para a bacia hidrográfica do Rio Negrinho.	54

Figura 13 - Demonstração da divisão da série histórica de vazões para o Split-Simple Test.....	68
Figura 14 – Demonstração da divisão da bacia hidrográfica do Rio Negrinho para o <i>Proxy-Catchment Test</i>	69
Figura 15 – Chuva anual de cada ano para a divisão dos anos secos e úmidos. A linha tracejada representa a média geral de todos os anos.	70
Figura 16 - Vazão anual de cada ano para a divisão dos anos secos e úmidos. A linha tracejada representa a média geral de todos os anos.	70
Figura 17 - Coeficiente de escoamento anual usada na divisão dos anos secos e úmidos. A linha tracejada representa a média geral de todos os anos.	71
Figura 18 – Quantidade de chuva por sub-bacia para o primeiro arranjo de três estações. 16a três estações não interpoladas; 16b três estações interpoladas; 16c forma gráfica da quantidade de chuva por sub-bacia.	74
Figura 19 - Quantidade de chuva por sub-bacia para o segundo arranjo de quatro estações; 17a quatro estações não interpoladas; 17b quatro estações interpoladas; 17c forma gráfica da quantidade de chuva por sub-bacia.	76
Figura 20 - Quantidade de chuva por sub-bacia para o terceiro arranjo de oito estações; 18a oito estações não interpoladas; 18b forma gráfica da quantidade de chuva por sub-bacia.....	78
Figura 21 - Separação dos escoamentos realizado pelo filtro automático <i>Base Flow Filter</i> proposto por Arnold et al. (1995).	80
Figura 22 - Simulação bruta com o modelo SWAT para os dados diários de 2003 a 2007.	81
Figura 23 – Curva de permanência das vazões simuladas (sem calibração) e observadas para bacia hidrográfica do Rio Negrinho nos anos de 2003 a 2007. (a) a curva em escala normal dos valores, e (b) a curva em escala logarítmica.....	82

Figura 24 - Processos mensais de calibração (2003 – 2009) e validação (2010 – 2012).....	85
Figura 25 - Processos mensais de calibração (2006 – 2012) e validação (2003 – 3005).....	86
Figura 26 - Valores de NSE (a) e Pbias (b) para as calibrações feitas pelo método <i>Differential Split-Sample Test</i>	88
Figura 27 – Aplicação do <i>Differential Split-Sample Test</i> para o ano de 2003, com sua calibração e respectivas validações.	92
Figura 28 - Aplicação do <i>Differential Split-Sample Test</i> para o ano de 2008, com sua calibração e respectivas validações.	94
Figura 29 - Aplicação do <i>Proxy-Catchment Test</i> . Processo de calibração (a) na porção da bacia simulada com os dados da estação Rio Negrinho Montante e validação (b) com os dados monitorados do exutório da bacia.	98
Figura 30 – Calibração do exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho para o ano de 2010, período de 21/05 a 17/11.....	99
Figura 31 - Demonstração dos valores envolvidos no balanço hídrico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho para calibração mensal no período de 2003 a 2009.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Estações de monitoramento meteorológico, pluviométrico e fluviométrico, bem como seus períodos e respectivos códigos quando disponíveis no HidroWeb.....	41
Tabela 2 - Nomenclatura e descrição dos tipos de solos referente à bacia hidrográfica do Rio Negrinho.	46
Tabela 3 - Relação dos parâmetros determinados pela análise de sensibilidade, bem como suas descrições, intervalos e valores máximos e mínimos (range).	66
Tabela 4 – Comparação dos dados mensais (NSE e Pbias) para as simulações com e sem interpolação das três estações pluviométricas.	75
Tabela 5 – Comparação dos dados mensais (NSE e Pbias) para as simulações com e sem interpolação das quatro estações pluviométricas.	77
Tabela 6 - Comparação dos dados mensais (NSE e Pbias) para as simulações com as oito estações pluviométricas interpoladas.	79
Tabela 7 – Ordenamento médio da sensibilidade dos parâmetros em relação a todas as simulações diárias.....	83
Tabela 8 - Valores de NSE e Pbias para as calibrações e validações mensais pelo método <i>Split-Sample Test</i>	85
Tabela 9 – Valores dos parâmetros calibrados para simulação mensal, referente ao <i>Split-Sample Test</i>	86
Tabela 10 – Apresentação dos valores diários do NSE e Pbias, na aplicação do <i>Differential Split-Sample Test</i> . A ‘entrada’ representa os valores de vazão do referente ano, e a ‘saída’ são os melhores valores calibrados de cada ano. Destacados em cinza os melhores valores de $NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$ para as validações; e sublinhados são os valores calibrados de cada ano.	91
Tabela 11 – Média dos valores de parâmetros para o <i>Differential Split-Sample Test</i> com a separação dos períodos secos e úmidos.....	96

Tabela 12 - Médias anuais dos volumes de escoamento, medidos (Med) e simulados (Sim), tanto para os dados brutos (simulados no SWAT sem calibração), como para os dados calibrados no passo diário e mensal.100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANA - Agencia Nacional de Águas
- ASCE – Sociedade Americana de Engenharia Civil
- BHRN – Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho
- CANMAX - Quantidade de água interceptada
- CEAP - Projeto de Avaliação dos Efeitos da Conservação
- CH_N1 - Coeficiente de *Manning* para os canais tributários
- CH_N2 - Coeficiente de *Manning* para o canal principal
- CH_K1 - Condutividade efetiva dos canais tributários
- CH_K2 - Condutividade efetiva do canal
- CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
- CN – Curva número
- CN2 - Curva Número inicial para condição de umidade do solo II
- DEM - Modelo Numérico do Terreno
- EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
- ESCO - Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo
- GW_DELAY - Intervalo de tempo para recarga do aquífero
- GW_QMN - Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno
- GW_REVAP - Coeficiente de ascensão de água à zona de saturação
- HidroWeb - Sistema de Informações Hidrológicas
- HRU – Unidade de Resposta Hidrológica
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- LATTIME - Escoamento lateral

logNSE – Função logarítmica do Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe*

NES – Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe*

Pbias – *Percent Bias*

PET - Evapotranspiração Potencial

RCHRG_DP - Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo

REF-ET - *Reference Evapotranspiration Calculation Software*

SCS - *Soil Conservation Service*

SLSOIL - Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial

SOL_AWC - Armazenamento de água no solo

SUF12 – *Sequential Uncertainty Fitting*

SURLAG - Coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

SWAT CUP - *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures*

USDA - Serviço de Pesquisas Agrícolas

USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
bt	escoamento de base (m^3/s)
c_p	calor específico do ar ($MJ.kg^{-1}/^{\circ}C$)
\bar{d}	distância entre os limites superior e inferior de 95PPU
E_a	evapotranspiração total diária no dia t (mm)
$e_s - e_a$	déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referencia medida (kPa)
ET_o	evapotranspiração potencial (mm/dia)
G	densidade do fluxo de calor no solo ($MJ.m^{-2}/dia$)
h	cota da água (m)
h0	constante
I_a	abstração inicial que abrange o armazenamento, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial (mm)
K_{time}	constante que depende da escala de tempo utilizada
k	o número de pontos de dados observados
n	constante
Q	vazão (m^3/s)
qt	valor filtrado da vazão no tempo t (m^3/s)
Qt	vazão no tempo t (m^3/s);
Q_{gw}	vazão de retorno no dia t (mm)
Q^{mean}	média da vazão observada, para as três equações (m^3/s)
Q_i^{obs}	vazão observa (m^3/s)
Q_i^{sim}	vazão simulada (m^3/s)

Q_{sup}	escoamento superficial total (mm)
$r(\mathbf{x})$	valores residuais
r_a e r_s	resistências totais da cobertura e aerodinâmica (sm^{-1})
R_{day}	precipitação total diária no dia t (mm)
R_n	saldo de radiação ($\text{MJ.m}^{-2}/\text{dia}$)
S	parâmetro de retenção (mm)
SW_t	quantidade final de água no solo (mm)
SW_0	quantidade inicial de água no solo (mm)
t	tempo (dias)
X_u	percentil correspondente a 97,5% da distribuição cumulativa de cada ponto simulado
W_{seep}	quantidade de água que entra e é armazenada no solo (mm)
∂_x	desvio padrão da variável medida x
β	parâmetro constante do filtro <i>Base Flow</i> (0,925)
λ	calor latente de vaporização (MJ/kg)
$\lambda_i^{\text{ks}}(\mathbf{x})$	pesos obtidos da resolução do sistema de krigagem
Δ	declividade da curva de pressão de vapor contra temperatura ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)
ρ_a	média da densidade do ar em pressão constante (kg.m^{-3})
γ	constante psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}^{-1}$)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	OBJETIVO GERAL.....	26
1.1.1	Objetivos Específicos	26
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	27
2.1.1	Chuva.....	28
2.1.2	Vazão.....	29
2.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA	29
2.2.1	Análise de sensibilidade, calibração e validação de modelos hidrológicos	30
2.3	O MODELO SWAT.....	34
2.3.1	O programa SWAT CUP.....	36
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	ÁREA DE ESTUDO	40
3.2	DADOS DE ENTRADA.....	41
3.2.1	Estações de monitoramento.....	41
3.2.3	Interpolação dos dados de chuva.....	47
3.2.4	Estimativa da vazão.....	50
3.2.5	Separação dos escoamentos.....	51
3.2.6	Evapotranspiração Potencial	52
3.3	MODELO SWAT.....	53
3.3.1	Escoamento superficial.....	54
3.3.2	Umidade do solo.....	61
3.3.3	Águas Subterrâneas	62

3.3.4	Fluxo Lateral.....	62
3.4	SWAT CUP	63
3.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS	65
3.5.1	Análise de sensibilidade	65
3.5.2	Descrição dos cenários de calibração e validação	68
3.5.2.1	Separação dos anos secos e úmidos	69
3.6	FUNÇÕES OBJETIVO	71
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA	73
4.2	SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS	79
4.3	SIMULAÇÃO SEM CALIBRAÇÃO	80
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	83
4.5	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	84
4.6	BALANÇO HÍDRICO	99
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	103
6.	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO A	115

1. INTRODUÇÃO

A busca pela gestão dos recursos hídricos deve ser fundamentada em conhecimento científico específico (Fragoso Jr. et al., 2009). O estudo da hidrologia é, portanto, um meio de conhecer os processos naturais e suas relações com o meio, e a modelagem hidrológica uma ferramenta auxiliar a estes estudos. Segundo Loague et al. (2006) a simulação hidrológica por meio de modelos tem recebido considerável atenção na última metade do século, permitindo a incorporação das características espaciais da bacia hidrográfica nos processos envolvidos.

Alguns propósitos e aplicações estão relacionados ao uso de modelos hidrológicos: sintetizar eventos hidrológicos passados; preenchimento de falhas em dados medidos; melhorar o entendimento sobre os processos hidrológicos; prever eventos futuros; prever com segurança dados que não estão disponíveis; avaliar os efeitos na bacia hidrográfica em função de mudanças no uso do solo e no clima (Klemes, 1986; Beven, 2001). Existem procedimentos básicos na adequação e verificação da eficiência de um modelo a uma bacia hidrográfica. Trate-se dos processos de calibração e validação. Onde, os parâmetros existentes no modelo são ajustados a partir da comparação com dados medidos em campo.

O *Soil and Water Assessment Tool* (Arnold et al., 1998) é um modelo hidrológico baseado na simulação dos processos de transformação chuva-vazão. A grande aplicabilidade do modelo caracteriza-o como uma ferramenta flexível, podendo ser utilizado para simular uma variedade de situações em bacias hidrográficas (e.g. cálculo de vazões, escoamento de base, produção de sedimentos e nutrientes) (Gassman et al., 2007). Entretanto, o processo de calibração ainda apresenta muitos desafios, como a representação das variabilidades temporais e espaciais de uma bacia (Muleta, 2012; Zhang et al., 2015), influenciando nos resultados obtidos nas simulações, por exemplo, de uso do solo e cenários climáticos (Rahbeh et al., 2014; Zhu et al., 2015). Embora as limitações da utilização de modelos hidrológicos em bacias com dados escassos sejam mencionadas por alguns autores (Bonumá et al., 2013), métodos abrangentes de calibração e validação (e.g. Klemes, 1986) são fracamente documentados (Andréassian et al., 2009) em aplicações do modelo SWAT em bacias brasileiras.

O presente estudo analisa os procedimentos necessários à adequação de um modelo hidrológico em nível de bacia hidrográfica, fundamentado em uma pergunta principal: Qual deve ser o melhor meio de ajuste de um modelo hidrológico? Justifica-se a realização do estudo

para testar a seguinte hipótese: um modelo hidrológico apto a ser usado em cenários de previsão, deve ser capaz de transitar de forma eficiente entre cenários com diferentes períodos climáticos e bacias com múltiplos usos do solo.

A escolha da bacia hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN), como área de aplicação deste estudo, está relacionada ao fato da bacia ser monitorada, com presença de dados de nível desde 2003 e de pontos de monitoramento de chuva, próximos a bacia, desde 1974. Além dos dados monitorados, a escolha da bacia está ligada a importância que esta tem para o município de Rio Negrinho. A bacia é responsável pelo abastecimento de água da cidade, porém enfrenta a problemática de urbanização acelerada e ocorrência de inundações. Giglio (2010) e Malutta (2012) também realizaram estudos nesta bacia, onde descrevem o processo de inundação na área urbana e; a dinâmica da água e verificação do aporte de sedimentos gerados (respectivamente). A principal contribuição deste estudo é avaliação de uma metodologia existente de calibração e validação. Considerando variações do clima e de uso do solo dentro de uma bacia hidrográfica.

1.1 OBJETIVO GERAL

Simular os processos hidrológicos e avaliar diferentes métodos de calibração para modelo SWAT na bacia hidrográfica do Rio Negrinho, localizada em Santa Catarina.

1.1.1 Objetivos Específicos

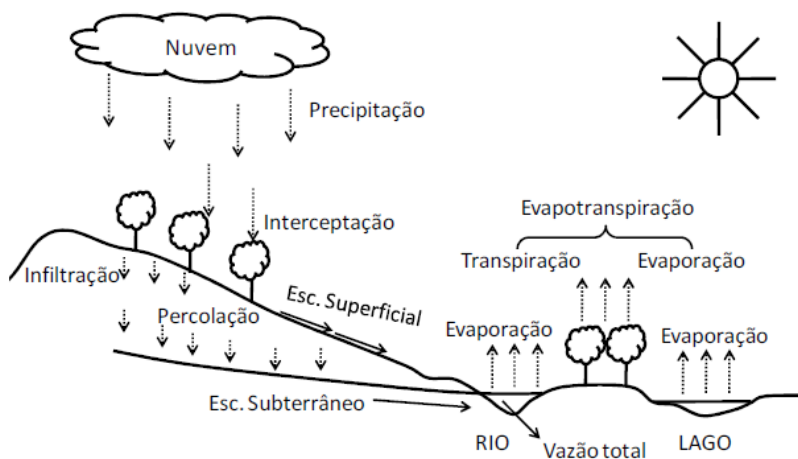
- a) Calibrar e validar o modelo SWAT com base na série histórica de vazões disponível da bacia hidrográfica do Rio Negrinho;
- b) Avaliar e comparar o desempenho do modelo em simular os anos secos e úmidos;
- c) Validar o modelo em outra sub-bacia para verificar o potencial do modelo em prever a variabilidade espacial e possíveis mudanças de uso do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS HIDROLÓGICOS

Sendo a água componente fundamental para todos os organismos vivos, a necessidade do estudo dos componentes hidrológicos é facilmente compreensível. O ciclo hidrológico é um fenômeno de circulação fechado da água dentro do globo terrestre, impulsionado pela energia solar, gravitacional e de rotação da terra (Silveira, 2013). É composto pelas três fases da água, e vários processos, entre eles: precipitação, evaporação, interceptação, transpiração, infiltração, escoamento superficial (Figura 1). A hidrologia, a ciência que descreve a ocorrência e o comportamento de água por toda Terra (Savenije, 2009).

Figura 1 – Demonstração dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. Fonte: Apostila de Hidrometria, Kobiyama, et al. (2011).



Tradicionalmente, a hidrologia é dividida em duas partes: Hidrologia Física, que se concentra na compreensão do sistema hidrológico e as técnicas necessárias para prever e modelar os processos físicos; e a Hidrologia Aplicada, a qual se preocupa com a gestão dos recursos hídricos (Clifford, 2002). Ao longo das últimas décadas, o aumento da tecnologia tem permitido o melhoramento das medições das variáveis hidrológicas, o que acarretou avanços fundamentais na

compreensão conceitual dos processos hidrológicos. O uso de tecnologias (e.g. computadores e sensores de medição) tem auxiliado na descrição de tais processos, bem como, a facilidade em representar os fenômenos em escala temporal e espacial (Committee on Challenges and Opportunities in the Hydrologic Sciences, 2012). Tão importante quanto o correto equacionamento dos processos hidrológicos, são os dados de entrada que alimentarão as equações representativas de tais fenômenos.

2.1.1 Chuva

A chuva é um dos aspectos mais relevantes em um modelo hidrológico, pois o controla balanço hídrico da bacia hidrográfica. Por sua capacidade de produzir o escoamento, a chuva é uma forma de precipitação muito importante para hidrologia (Zang e Srinivasan, 2009; Tucci, 2013; Gálvan et al., 2014). A representação exata da distribuição das chuvas (e.g. os registros de postos pluviométricos) é essencial para modelagem quantitativa da água, sendo que o modelo não será capaz de gerar previsões precisas se a chuva não é adequadamente caracterizada (Beven, 2001; Gálvan et al., 2014).

O volume e intensidade das chuvas podem variar rapidamente no espaço e no tempo, especialmente em chuvas convectivas. Sendo assim, pode ser necessária uma interpolação, dos dados os postos pluviométricos, para melhor representação dos volumes e variabilidade espacial da chuva na bacia (Beven, 2001). Arnold et al. (2012) descrevem que alguns dos resultados ineficientes (de acordo com os objetivos dos trabalhos) publicados em estudos com o uso do SWAT podem ser parcialmente atribuídos a cobertura espacial ineficaz dos dados de chuva. Causados pelos inadequados números de postos de monitoramento ou uma configuração espacial que não consegue capturar a espacialidade da chuva.

Além dos dados de chuva obtidos por medições pontuais, eles podem ser obtidos via radares e satélites. Esses últimos são geralmente recomendados quando não existe o monitoramento convencional, ou auxiliando, por exemplo, no preenchimento de falhas na série histórica (Dile e Srinivasan, 2014).

2.1.2 Vazão

A vazão é um bom exemplo de processo-base para realização da calibração de um modelo hidrológico, pois é componente do balanço hídrico na fase terrestre (Arnold et al., 2012). Porém, é relativamente trabalhoso medi-la diretamente, em um intervalo de tempo curto (e.g. 5 em 5 minutos) e por longos períodos consecutivos. Existem muitas maneiras de se medir tal descarga. O nível de água é a maneira indireta mais simples para obter tais resultados (Beven, 2001). Segundo Jaccon e Cudo (1989) a curva-chave é a equação que relaciona a descarga com o nível de água em uma seção de controle, sendo que essa função depende das características geométricas e hidráulicas do canal monitorado.

A separação dos escoamentos é outro passo a ser realizado em estudos hidrológicos (Arnold et al., 1995). O escoamento total pode dividido em três tipos diferentes: escoamento superficial, subsuperficial e de base. Pelo fato da separação entre os escoamentos superficial e subsuperficial ser relativamente difícil de serem realizados, quando são ausentes medições específicas realizadas em campo, vários métodos desconsideram essa separação (e.g. Nathan e McMahon, 1990). Para este estudo essa divisão também foi desconsiderada.

2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Mesmo que alguns fenômenos hidrológicos sejam comuns (e.g. chuva e escoamento de rios), é inadequado crer que se tem o domínio sobre todas as leis naturais que os regem, tendo em vista sua característica essencial de variabilidade no tempo e espaço (Pinto et al., 1976). Tucci (2005) e Tucci (2013) afirmam que é com base nos registros e análises das variáveis hidrológicas que é possível compreender estes fenômenos e representá-los matematicamente. Modelos hidrológicos são, portando, um conjunto de equações físicas e matemáticas utilizadas para auxiliar o entendimento do comportamento da água dentro de uma bacia hidrográfica. Os modelos podem ser classificados por diferentes aspectos, tais como: tipos de variáveis utilizadas (estocástico ou determinístico); tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual); a forma de representar os dados (discretos ou contínuos); a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estatísticos ou dinâmicos).

Dificuldades encontradas na modelagem ambiental estão associadas à própria complexidade natural. Sistemas naturais, em escala de bacias, tendem a mostrar grande variação, muitos modelos hidrológicos, por exemplo, homogeneizam características topográficas, variabilidade dos sedimentos, e fontes de perturbação, o que pode acarretar previsões não representativas destes sistemas. Sendo assim, várias categorias de modelos são encontradas hoje, onde seus mecanismos se diferenciam no nível de detalhamento dos processos envolvidos, o que pode dificultar em alguns momentos a escolha do modelo mais adequado. Quando vamos definir o modelo ideal ao nosso estudo, devemos ter a clareza dos dados que serão necessários para sua aplicação (entradas), bem como o objetivo e os resultados que queremos alcançar (saídas) (Merritt et al., 2003).

A grande aplicabilidade que modelos hidrológicos têm nos dias atuais, gera a necessidade de métodos que possam identificar o quão bem o modelo está representando a realidade desejada. O uso será vantajoso somente se estes puderem prever com segurança dados que não estão disponíveis (Klemes, 1986; Xu, 1999). O uso de computadores nas simulações quali-quantitativas da água, permite uma economia significativa de custos e tempo de projeto (Moriassi et al., 2007). As avaliações das mudanças climáticas e no uso do solo ao longo do tempo, por exemplo, são comumente feitas por modelos hidrológicos automatizados (Moriassi et al., 2012). Tais modelos geralmente contêm uma grande quantidade de parâmetros envolvidos em seus processos. Porém, para cada estudo, alguns parâmetros são mais sensíveis, e devem ser avaliados para obtenção de simulações mais eficientes (Rossi et al., 2008). Os procedimentos base de adequação e verificação de um modelo hidrológico a uma bacia hidrográfica são: análise de sensibilidade dos parâmetros; calibração e validação da série histórica disponível; e verificação da eficiência dos resultados.

2.2.1 Análise de sensibilidade, calibração e validação de modelos hidrológicos

Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é um método que permite avaliar quanto os resultados dos modelos hidrológicos são sensíveis às suas variáveis ou parâmetros, de uma forma sistemática e livre da variação de erros existentes em dados mensurados. Este método pode identificar parâmetros que têm ou não uma influência significativa sobre as

simulações (McCuen e Snyder, 1986; van Griensven et al., 2006). A quantidade excessiva de parâmetros é um problema conhecido em modelos hidrológicos, especialmente em modelos distribuídos e semi-distribuídos. Assim, os métodos para reduzir o número de parâmetros na calibração, por análise de sensibilidade são importantes para a utilização eficaz destes modelos (van Griensven et al., 2006). O usuário determinará quais variáveis devem ser ajustadas de acordo com seu conhecimento sobre a bacia ou uma análise de sensibilidade automática (Arnold et al., 2012). O desconhecimento dos parâmetros mais sensíveis poderá ocasionar em resultados menos eficientes, e tempo gasto de forma desnecessária em ajustes nas simulações (Lenhart et al., 2002).

Calibração e Validação

A partir do momento em que se identificam os parâmetros mais sensíveis à área de estudo, o processo de calibração deve ser iniciado, consistindo basicamente em encontrar a melhor faixa de valores para os parâmetros selecionados (Arnold et al., 2012). O processo de calibração pode ser realizado por tentativa e erro, forma manual; ou por forma semiautomática e automática, que utilizam algoritmos e funções objetivo para calcular as diferenças entre os valores observados e simulados (Fragoso Jr. et al., 2009). A função objetivo pode ser definida como uma equação utilizada para medir a distância entre a saída do modelo e os valores observados. Existem diferentes funções objetivo, as quais são escolhidas de acordo com a finalidade do estudo hidrológico, direcionando a calibração do modelo para aperfeiçoar a simulação dos diferentes elementos do hidrograma, como a recessão ou então as vazões de pico (Gupta et al., 1999).

Segundo Beven (2001), as publicações relacionadas à metodologia e às técnicas de calibração e cálculo da incerteza possuem três vertentes: a) métodos de calibração que assumem ser possível encontrar uma combinação com valores ideais dos parâmetros e que ignoram a possibilidade de mensurar as incertezas de predição. Neste grupo a calibração é feita de forma manual ou automática, utilizando algoritmos de otimização; b) métodos de calibração que assumem ser possível encontrar uma combinação com valores ideais dos parâmetros, mas que fazem suposições em relação à superfície de resposta ao redor do ótimo global para mensurar as incertezas; c) métodos de calibração que rejeitam a ideia de que existe uma combinação com valores ideais dos parâmetros, os quais admitem que existam diferentes combinações

de valores para os parâmetros que podem fornecer simulações aceitáveis.

A maioria dos estudos de calibração envolve a otimização dos parâmetros na comparação dos resultados das simulações com os dados observados disponíveis. Além disso, é necessário determinar valores iniciais para os parâmetros, os quais servem como ponto de partida para a calibração. Testes que determinam o grau de incerteza no modelo também são recomendados no uso de procedimentos automáticos de calibração (Yapo et al., 1996; Gupta et al., 1999; Beven, 2001). Beven (2001) ainda alerta que os valores dos parâmetros determinados na calibração são válidos apenas na estrutura do modelo para qual a calibração foi realizada, podendo não ser adequado o uso desses resultados em outros modelos ou diferentes bacias hidrográficas.

Uma das questões centrais de trabalhos que envolvem modelagem hidrológica é: Como podemos dar credibilidade de aplicação a um determinado modelo? A simples calibração de uma série histórica de dados quaisquer pode ser razoavelmente aceitável para casos mais simples, porém um modelo considerado eficiente deve ser capaz de simular condições diferentes das observadas. A filosofia por trás do esquema pode ser resumida da seguinte forma: um modelo deve demonstrar o quão bem pode executar o tipo de tarefa para o qual se destina. Uma vez, que nenhum modelo tem apenas por objetivo mostrar o quão bem ele se encaixa aos dados utilizados para o seu desenvolvimento, o desempenho do conjunto de dados da calibração não é evidente o suficiente para o desempenho satisfatório. Assim, deve existir um período de dados destinados para a validação do modelo (Klemes, 1986), ou seja, o passo seguinte na previsão do componente de interesse (e.g. vazão e produção de sedimentos) é a validação, a qual consiste na demonstração de que o modelo é capaz de realizar simulações aceitáveis. A validação se resume em rodar o modelo com os valores de parâmetros determinados na calibração, sendo que a série de validação não pode ser a mesma da calibração (Arnold et al., 2012).

Existem diferentes metodologias de calibração disponíveis em literatura. Andréassian (2005), por exemplo, aplica em seu estudo um método chamado *Subsampling*, onde a escolha do intervalo de calibração é feita de maneira aleatória dentro do período total de dados disponíveis. Em 2009 o mesmo autor apresenta outra proposta, o chamado *Crash Test*, que consiste em aplicar um mesmo método de calibração (e.g. os propostos por Klemes, 1986) em uma grande quantidade de bacias (para seu estudo foram 600), como maneira de garantir a confiabilidade do modelo hidrológico escolhido.

Os métodos de calibração escolhidos para este trabalho são os propostos por Klemes (1986), que apresenta uma estrutura hierárquica de testes complementares. Baseados na comparação de dados observados e simulados, com o propósito de verificar a eficiência do modelo em transitar entre diferentes cenários (e.g. mudanças do clima e uso do solo). Para cenários de mudanças do clima a primeira etapa é garantir uma série histórica longa o suficiente para representar estas mudanças, ou seja, a presença de anos secos e úmidos deve ser garantida (Gan et al., 1997; Klemes, 1986; Arnold et al., 2012)

Segue-se então com a realização de dois testes: *Split-Sample Test* e *Differential Split-Sample Test*. No primeiro (mais comumente utilizado), a série é dividida dois em segmentos, um para calibração e outro para validação, e a presença de anos secos e úmidos deve ser garantida em ambos os períodos, o modelo será considerado adequado se os dois segmentos forem calibrados e validados de forma similar e aceitável. Para o *Differential Split-Sample Test*, onde o objetivo é verificar a capacidade do modelo em transitar entre os diferentes períodos climáticos, os anos úmidos devem ser calibrados separadamente, validados em anos secos, e vice-versa. O terceiro teste, o *Proxy-Basin Test* consiste em dar confiabilidade ao modelo em ser usado em uma bacia diferente daquela para o qual foi criado e/ou testado, dando maior validade geral ao uso do SWAT. Xu, 1999 ainda relata que o teste tem potencial de verificar a adequação do modelo em prever impactos na mudança do uso do solo. Neste, o modelo deve ser calibrado em uma bacia, e validado de maneira eficaz em outra de uso do solo semelhante.

Indicadores estatísticos são a forma mais comum para a avaliação da eficiência de um modelo hidrológico, podendo revelar aspectos interessantes para compreensão das vantagens de uso, restrições e limitações do modelo (Fragoso Jr., et al., 2009). Moriasi et al. (2007) citam algumas razões pelas quais o NSE (*Nash-Sutcliffe efficiency*) deve ser um indicador de avaliação de modelos hidrológicos: é altamente recomendado pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE); é comumente usado, o que fornece maiores informações sobre seus valores e; estudos mostram que o NSE é a melhor função objetivo no ajuste de um hidrograma (e.g. Sevati e Dezzeter, 1991). Para o Pbias (*Percent Bias*), o autor também relata algumas vantagens: durante anos secos e úmidos, o valor do Pbias, tende a variar entre os diferentes períodos de autocalibração, o método é muito utilizado quando se pretende avaliar a eficiência da calibração e validação de modelos

hidrológicos; tem uso comum na avaliação de erros no balanço hídrico e; capacidade de identificar o baixo desempenho do modelo.

Em geral boas simulações, envolvem em seus períodos de calibração e validação: representações de anos secos e úmidos; mais de uma técnica de avaliação; e a verificação se as outras saídas do modelo possuem resultados coerentes (e.g. evapotranspiração, vazão de base). Para Fragoso Jr. et al. (2009) a modelagem deve ser utilizada em parceria com trabalhos experimentais, laboratoriais e de monitoramento; caso contrário, sua potencialidade de aplicação pode ser comprometida.

2.3 O MODELO SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT, é uma continuação de quase 30 anos de esforços de modelagem realizados pelo USDA - Serviço de Pesquisas Agrícolas. É um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo, que foi desenvolvido para simular o impacto das mudanças no uso do solo, sedimentos e químicos agrícolas em bacias hidrográficas de médio e grande porte (Arnold et al., 1998). Os componentes simulados pelo modelo incluem hidrologia, meteorologia, erosão, crescimento de plantas/culturas, gestão do uso da terra e nutrientes. O SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias para depois, em unidades de resposta hidrológica (HRUs), sendo cada HRU composta por uma única combinação de cobertura e tipo de solo. O escoamento superficial é calculado com base no escoamento em cada sub-bacia, e em seguida, através dos canais. Uma versão modificada do método SCS (curva número) é usada para escoamento superficial, enquanto a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) é usada para do cálculo da erosão e produção de sedimentos (Neitsch et al., 2009).

O modelo foi adotado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) no programa *Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources*, e é utilizado por muitas agências federais e estaduais do país, incluindo a própria USDA dentro do projeto de Avaliação dos Efeitos da Conservação (CEAP). Atualmente, mais de 650 artigos publicados foram identificados relatando as aplicações do SWAT, entre revisões, ou outras pesquisas que incluem o modelo. A grande aplicabilidade do modelo caracteriza-o de certa forma como uma ferramenta flexível e aceita pela comunidade científica, podendo ser utilizado para simular uma variedade de situações em bacias hidrográficas. O processo de configuração do SWAT para uma determinada bacia é facilitado pelo desenvolvimento

da interface GIS, a qual fornece um meio mais simples de tradução dos dados existentes em um Modelo Numérico do Terreno e mapas de uso e tipo do solo, por exemplo (Gassman et al., 2007; Gassman, 2011).

Diversos estudos têm sido feitos no Brasil com o intuito de adequar o modelo às bacias de interesse. Garbossa et al. (2011) revisou trabalhos de 1999 a 2010 e concluiu que foram registrados 74 trabalhos com o uso do modelo. A distribuição dos trabalhos resultaram em: 51% estão nos estados de São Paulo, Santa Catarina e Paraná; e quanto à natureza do estudo, 43% sobre sedimentos, 41% sobre vazões e 16% na simulação de carga de poluentes. Em uma revisão mais recente Bressani et al. (2015) encontrou mais de 100 trabalhos (1999 a 2014), entretanto poucos publicados em periódicos. Destaca-se que:

- O modelo tem sido usado para análise de vazões (Machado et al., 2003; Carvalho Neto et al., 2011; Melo Neto et al., 2013; Bonumá et al., 2013), em estudos que investigam o transporte de sedimentos e poluentes (Baltokoski et al., 2010; Lelis et al., 2012; Lubitz et al., 2012; Malutta, 2012; Uzeika et al., 2012; Bonumá et al., 2014), e na criação de cenários hipotéticos (Carvalho Neto et al., 2011);
- Muitos estudos incluem análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo. Em alguns casos a validação não é feita, com a justificativa da ausência de uma maior série de dados (Machado et al., 2003; Baltokoski et al., 2010; Carvalho Neto et al., 2011; Lubitz et al., 2012);
- O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é o indicador estatístico de uso unânime na avaliação da eficiência do modelo. Souza e Santos (2013) utilizam o logNSE para analisar vazões mínimas;
- De maneira geral o SWAT mostrou-se eficiente para as simulações nas bacias estudadas ($NSE \geq 0,5$, Moriasi et al., 2007). Entretanto alguns autores encontraram dificuldades na calibração do modelo em pequenas bacias, como Uzeika et al. (2012) (1,19 km²) e Melo Neto et al. (2013) (4,7 km²).

Embora as limitações da utilização de modelos hidrológicos em bacias com dados escassos sejam mencionadas por alguns autores (Bonumá et al., 2013) métodos abrangentes de calibração e validação (e.g. Klemes, 1986) são fracamente documentados em aplicações do modelo SWAT em bacias brasileiras.

2.3.1 O programa SWAT CUP

O modelo SWAT conta com o SWAT CUP (*SWAT Calibration and Uncertainty Procedures*), ferramenta disponível para auxiliar a calibração, validação e análises de incerteza dos projetos gerados no SWAT (Eawag, 2009). O programa integra cinco procedimentos de calibração e análise de incerteza semiautomáticos: *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2) (Abbaspour et al., 2004; Abbaspour et al., 2007); *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) (Beven e Binley, 1992); *Parameter Solution* (ParaSol) (van Griensven et al., 2006); *Mark chain Monte Carlo* (MCMC) (Kuczera et al., 1998); e *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Kennedy e Eberhart, 1995). O SUFI2 é um método bastante difundido entre os usuários do modelo SWAT (Abbaspour et al., 2007; Farmazi et al., 2009; Rouholahnejad et al., 2012; Abbaspour et al., 2012; Bilond et al., 2012; Qiao et al., 2013; Mamo e Jain, 2013; Ridwansyah et al., 2014;), e foi o selecionado para a realização deste estudo.

O método é capaz de analisar um grande número de parâmetros e dados observados, em diferentes estações de monitoramento simultaneamente. Segundo Rouholahnejad et al. (2012), o método do hipercubo latino é o utilizado na definição dos valores dos parâmetros. Cada valor de parâmetro selecionado é substituído dentro do projeto do SWAT, esse processo é realizado quantas vezes o usuário achar necessário (Abbaspour et al. (2006) recomenda que o número de simulações seja relativamente grande 500-1000). Vale ressaltar que a definição final dos valores está diretamente relacionada com a função objetivo escolhida. A plataforma apresenta sete funções que podem ser selecionadas: 1) a forma multiplicativa do erro quadrado; 2) soma dos quadrados dos erros; 3) o coeficiente de determinação; 4) *Nash-Sutcliffe*; 5) o qui-quadrado; 6) coeficiente de determinação R^2 multiplicado pelo coeficiente da linha de regressão; 7) soma do quadrado residual; 8) *Percent Bias*. Somente uma função objetivo pode ser usada durante a calibração.

A incerteza dentro do programa é calculada a partir de todas as incertezas de entrada e saída (e.g. dados pluviométricos, uso e tipo do solo e vazão). Sendo quantificada por 95% da incerteza de previsão (95PPU), que é definida pelo *p-factor*. O 95PPU é calculado entre 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa da variável de saída, obtida pelo hipercubo latino. Outra medida de quantificação da eficiência da análise de incerteza e calibração é o *r-factor*, que é a espessura média do 95PPU dividido pelo desvio padrão dos dados observados. Teoricamente, o *p-*

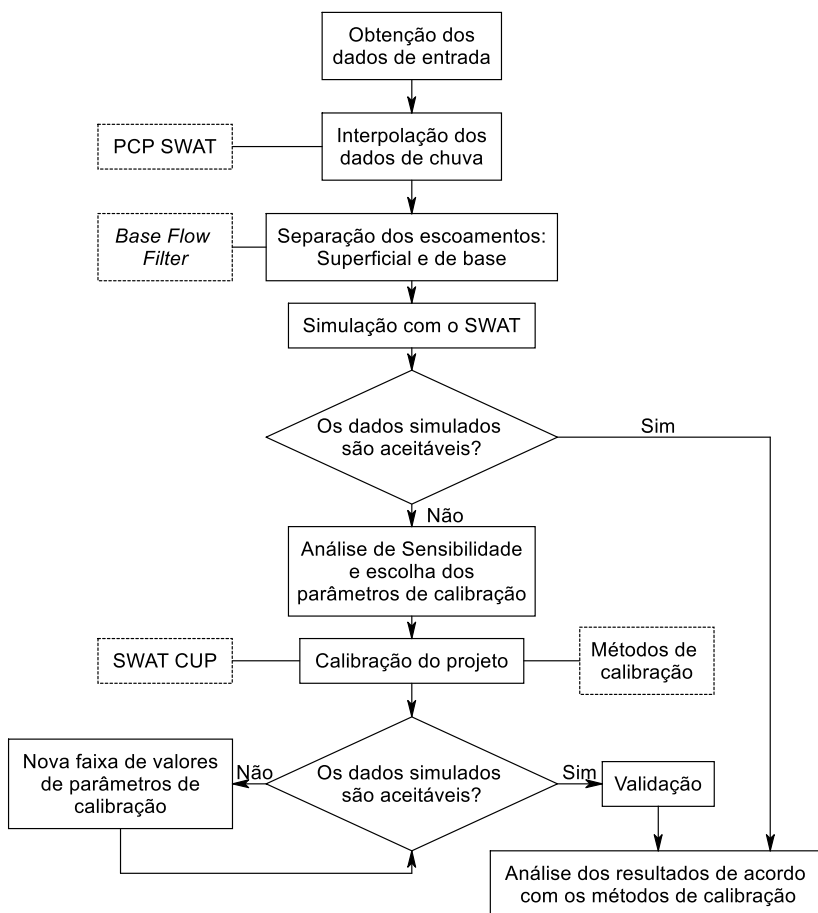
factor varia entre 0 e 100%, enquanto o *r-factor* entre 0 e infinito. Um *p-factor* igual a 1 e *r-factor* igual a 0, são simulações que correspondem exatamente aos dados observados.

Por fim, a sensibilidade dos parâmetros pode ser feita de duas maneiras: análise de sensibilidade global e *one-at-a-time*. A análise de sensibilidade global é calculada através do sistema de regressão linear múltipla, a qual faz a regressão dos valores gerados pelo hipercubo latino em relação aos da função objetivo, o *t-test* e o *p-value* são utilizados para identificar a importância relativa de cada parâmetro. A *one-at-a-time* mostra a sensibilidade de uma variável se todos os outros parâmetros permanecem constantes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho consiste em aplicar uma proposta com diferentes cenários de calibração e validação complementares para modelos hidrológicos. O estudo de caso foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Negrinho com a utilização do modelo SWAT. Na Figura 2 são apresentados os procedimentos realizados.

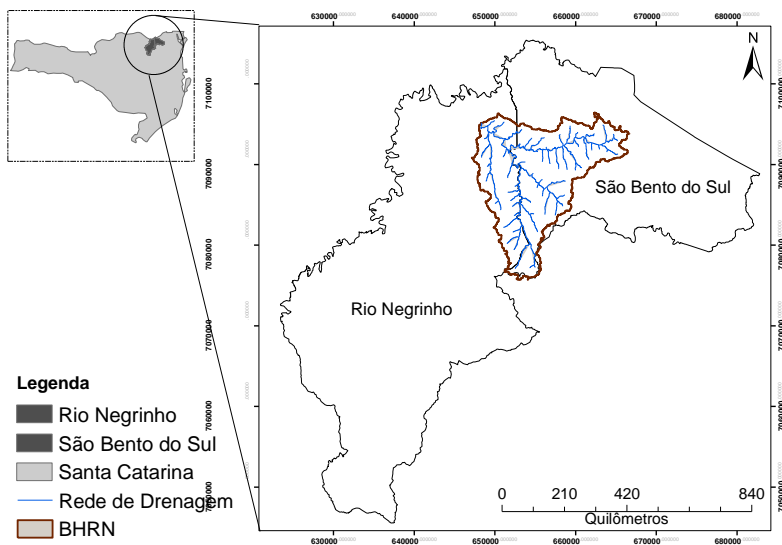
Figura 2 - Fluxograma demonstrativo dos procedimentos realizados neste estudo.



3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN) está localizada na região do Alto Rio Negro, norte do estado de Santa Catarina, entre municípios de Rio Negrinho e São Bento do Sul, com uma área de 198,5 km² (Figura 3). A bacia é importante para o município de Rio Negrinho, pois é responsável pelo abastecimento de água da cidade. Alguns problemas relativos à bacia estão ligados a fenômenos hidrológicos intensos, com registros de inundações desde 1891, com pelo menos 22 eventos registrados; além das problemáticas relatadas por Malutta (2012), como: a substituição da mata nativa por plantações de pinus; assoreamento dos rios; e ocupação pela população em áreas de risco.

Figura 3 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Negrinho, Santa Catarina.



O clima da região (segundo a classificação de Köppen) é temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verões frescos (Cfb). A temperatura média anual varia entre 15,5 a 17,0°C, sendo que as temperaturas médias máximas variam de 24°C a 26,6°C e mínimas de 10,8°C a 11,8°C. A precipitação anual média é de 1720 mm, com

máxima e mínima de 2500 e 1082 mm, respectivamente e umidade relativa do ar variando entre 80% a 86,2% (EPAGRI/CIRAM, 2014).

Na BHRN o tipo de solo Cambissolo e algumas variações, são predominantes em quase toda a sua extensão (98,6%), apresentando apenas uma pequena porção de Gleissolos (1,4%) nas nascentes da parte oeste da bacia. A bacia é caracterizada pela presença de Floresta Ombrófila Mista (60%), reflorestamento de pinus (14%), agricultura (8%), e área urbana (4%).

3.2 DADOS DE ENTRADA

O SWAT é processado em cima de uma interface GIS – ArcSWAT, o qual necessita para sua simulação dados meteorológicos, pluviométricos, uso e ocupação do solo, modelo numérico do terreno e tipo de solo.

3.2.1 *Estações de monitoramento*

Os dados meteorológicos (unidade relativa, radiação, temperatura e velocidade do vento) foram obtidos junto a EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina). Os dados pluviométricos dos quatro pontos de monitoramento utilizados neste estudo, foram obtidos no site do HidroWeb operado pela ANA (Agência Nacional de Águas), os períodos dos dados vão de 1999 a 2012 (Tabela 1 e Figura 4). Os dados pluviométricos e meteorológicos são usados na entrada do modelo, e os dados de nível, transformados em vazão, são utilizados no processo de calibração do modelo.

Tabela 1– Estações de monitoramento meteorológico, pluviométrico e fluviométrico, bem como seus períodos e respectivos códigos quando disponíveis no HidroWeb.

Estação	Código	Tipo	Período
EPAGRI	-	Meteorológica/ Pluviométrica	1999 – 2012
Corredeiras	02649055	Pluviométrica	1999 - 2012
Campo Alegre	02649057	Pluviométrica	1999 - 2012
Rio Novo	02649064	Pluviométrica	1999 – 2012
Rio Negrinho	6593000	Fluviométrica	2003 – 2012
Montante			
Exutório	-	Nível	2010

O monitoramento no exutório da BHRN (Figura 4) deu início no ano de 2009 com o trabalho de Malutta (2012) e em 05/2014 os equipamentos de monitoramento foram reinstalados. Contendo um sensor de pressão (nível), réguas linimétricas, um pluviógrafo e um sensor de turbidez, para este estudo foram utilizados apenas os dados de nível.

O *datalogger* (H-500XL) para armazenamento dos dados, o sensor de pressão (nível) (H-130) e pluviógrafo (H-310) são da marca *WaterLOG®* e o sensor de turbidez (DTS 12) da marca FTS. Todos os equipamentos operam em intervalo sub-diário de 10 em 10 minutos. Estes dados, transformados para diários, foram utilizados para calibração e validação do modelo, no período de 21/05/2010 a 17/11/2010. A Figura 5 apresenta o corte transversal da estação de monitoramento e a Figura 6 os equipamentos utilizados no monitoramento do exutório.

Figura 4 - Localização espacial das estações de monitoramento na bacia hidrográfica do Rio Negrinho.

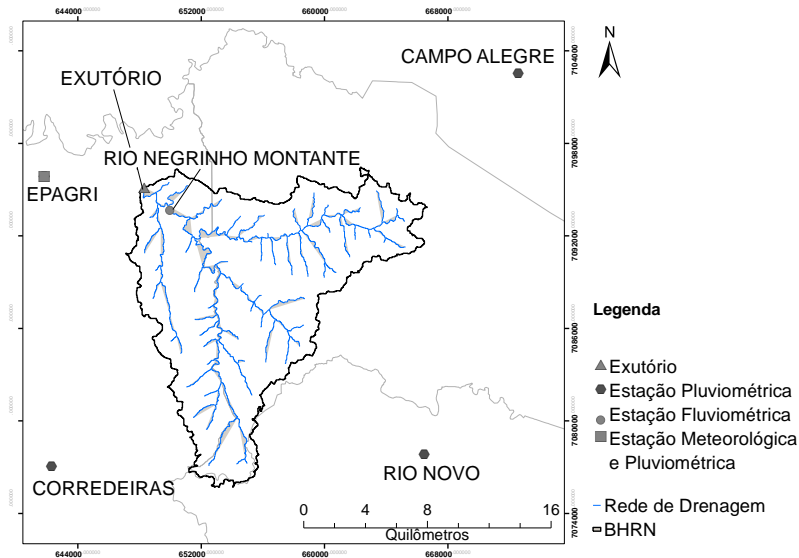


Figura 5 - Corte transversal do exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho e localização dos equipamentos de monitoramento.

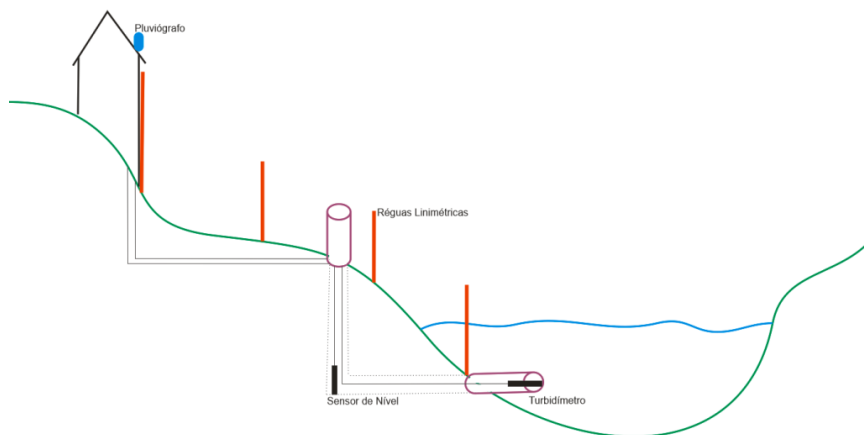


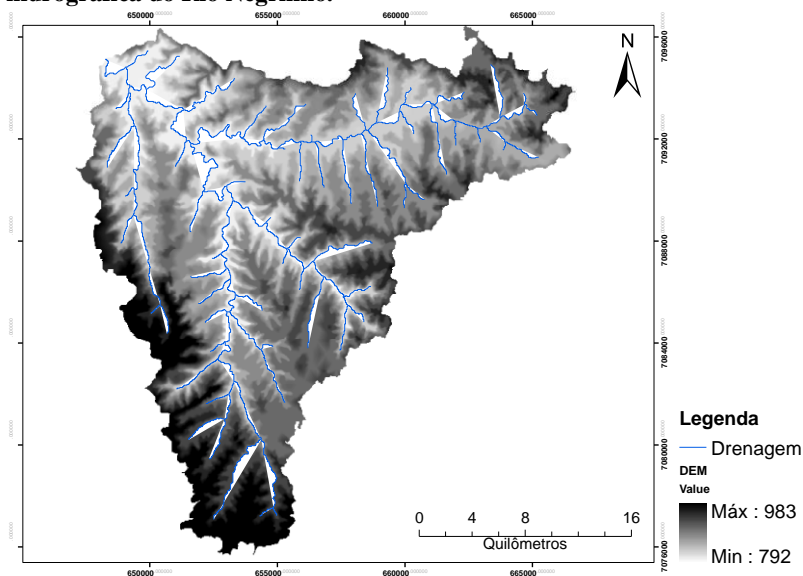
Figura 6 – Equipamentos utilizados para monitoramento no exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho. a) turbidímetro; b) datalogger; c) pluviôgrafo; d) sensor de nível.



3.2.2 Material cartográfico

O Modelo Numérico do Terreno (DEM), com uma resolução de células de 30m, foi feito a partir de curvas de nível e pontos cotados presentes nas cartas topográficas de Rio Negrinho e São Bento do Sul, na escala 1:50.000 (Malutta, 2012). A partir do DEM, nota-se que a bacia hidrográfica do Rio Negrinho possui uma variação de altitude de 191m com elevações mínimas e máximas entre 792m a 983m, nota-se que a porção mais alta da bacia esta na parte Sudoeste (Figura 7).

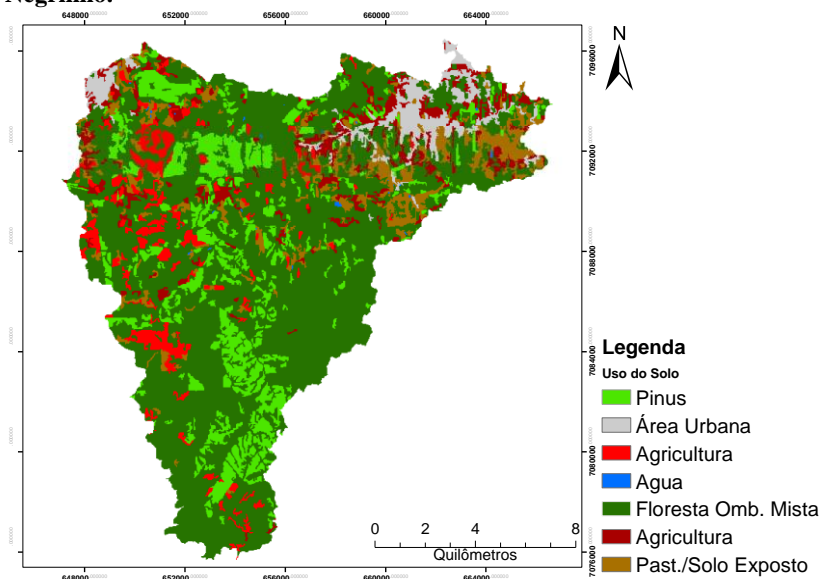
Figura 7 – Modelo Numérico do Terreno e rede de drenagem para bacia hidrográfica do Rio Negrinho.



Para composição do mapa de uso do solo foram utilizadas imagens do satélite Landsat/TM-5 datadas de março de 2010 (Figura 8). Cerca de 60% da bacia é composta pela Floresta Ombrófila Mista, vegetação típica dos planaltos da região Sul do Brasil, em altitudes superiores a 500m, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A composição florística é fortemente influenciada pelas baixas temperaturas e pela ocorrência de geadas no inverno, a espécie típica é a *Araucária angustifolia* (Roderjan et al., 2002). Segundo o senso do IBGE de 2010 as culturas agrícolas com mais área plantada na região são milho (2000 ha), soja (3000 ha), somadas as áreas agrícolas são

cerca de 8% da área da bacia e a plantação de pinus que sozinha corresponde a 14%. A área urbana é cerca de 4% e pode ser considerada de baixa densidade e as pastagens são 9% da área.

Figura 8 – Uso e ocupação do solo para bacia hidrográfica do Rio Negrinho.

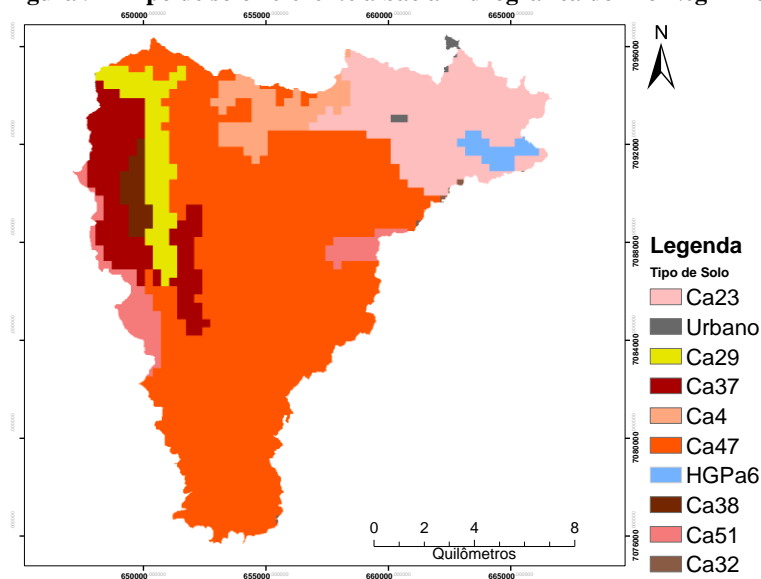


O mapa do tipo de solo (Figura 9) foi elaborado com base no levantamento de solos (escala 1:250.000) realizado pelo CIRAM (Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina) no ano de 2004. A bacia apresenta dez tipos de solos diferentes, sendo nove da classe ambissolos e apenas um da classe Gleissolos. Os solos de maior ocorrência são Cambissolo Álico Tb A proeminente (Ca47) e Associação Cambissolo Álico Tb A moderado (Ca23), associados a um relevo ondulado e forte ondulado, ocupando respectivamente 59,2% e 15,2 % da área total da bacia. A Tabela 2 apresenta a nomenclatura referente a cada solo, algumas características, e a porcentagens destes em relação a bacia.

Tabela 2 - Nomenclatura e descrição dos tipos de solos referente à bacia hidrográfica do Rio Negro.

Sigla	Nome	Característica	%
Ca4	Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura argilosa cascalhenta, fase floresta tropical perenifólia, relevo forte ondulado.	4,5
Ca9	Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo suave ondulado e ondulado.	5,3
Ca23	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura argilosa + Podzólico Bruno-Acinzentado Álico A moderado, textura médio-argilosa, ambas as fase floresta subtropical perenifólia, relevo ondulado e forte ondulado.	15,2
Ca32	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura argilosa, relevo montanhoso + Solos Litólicos Distróficos A moderado, textura argilosa, relevo montanhoso e escarpado, ambas as fase floresta tropical perenifólia.	0,2
Ca37	Cambissolo Álico Tb A moderado e proeminente	Textura média, fase floresta e campo subtropical, relevo ondulado e forte ondulado.	8,7
Ca38	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura média, relevo forte ondulado + Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa, relevo ondulado + Podzólico	1,6
Ca47	Cambissolo Álico Tb A proeminente	Textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo forte ondulado.	59,2
Ca51	Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente	Textura argilosa, relevo ondulado + Solos Litólicos Álicos A proeminente, textura média, relevo forte ondulado, ambas as fase floresta subtropical perenifólia.	3,9
HGPa6	Associação Glei Pouco Húmico Álico Tb	Textura média, relevo plano + Cambissolo Álico Tb gleico A húmico, textura argilosa, relevo praticamente plano, ambos fase floresta subtropical.	1,4

Figura 9 – Tipo de solo referente à bacia hidrográfica do Rio Negroinho.

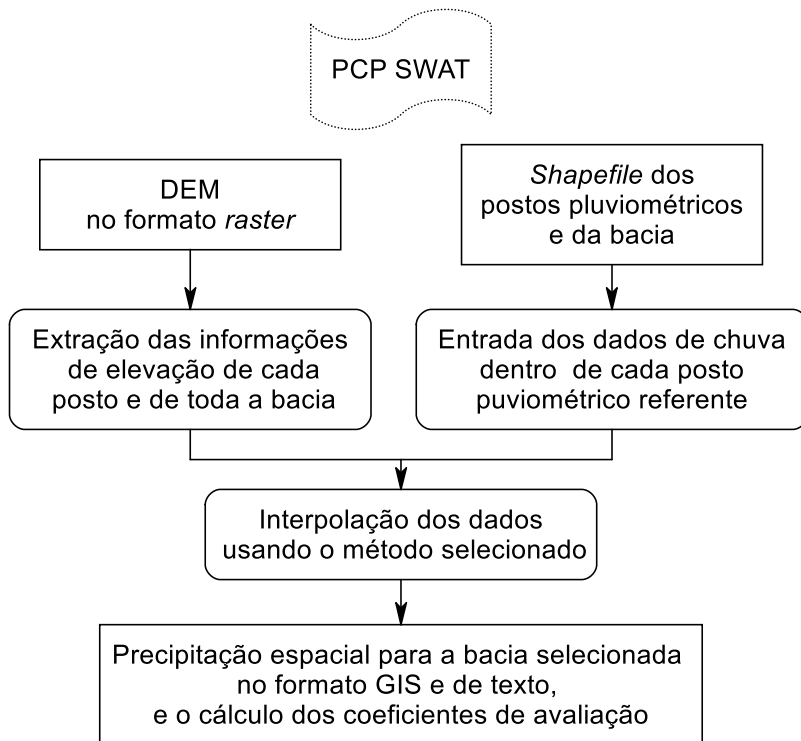


3.2.3 Interpolação dos dados de chuva

O PCP SWAT (Zhang e Srinivasan, 2009) é uma ferramenta GIS automática desenvolvida para facilitar a estimativa da precipitação espacial utilizando dados pluviométricos observados.

Os dados de entrada do programa incluem: *shapefile* contendo a localização geográfica dos postos pluviométricos e da bacia hidrográfica de estudo; arquivos em formato de texto com os dados diários de precipitação para cada ponto; e o Modelo Numérico do Terreno (DEM) para fornecer as informações sobre as elevações na bacia. O programa lê automaticamente o valor de precipitação para cada dia em cada pluviômetro, e o método de interpolação selecionado pelo usuário é implementado para estimar a distribuição espacial da precipitação na bacia. Os dados de saída consistem em um novo arquivo *shapefile* e de texto com as novas estações interpoladas, e análises estatísticas que avaliam a precisão da interpolação dos dados (Figura 10).

Figura 10 – Fluxograma do processo de interpolação realizado pelo PCP SWAT. Fonte: Adaptado de Zhang e Srinivasan (2009).



Dez métodos estão disponíveis no PCP SWAT para espacialização dos dados de chuva: Polígono de Thiessen; Distância Inversa Ponderada; Krigagem Simples; Krigagem simples com diferentes médias locais com elevação como variável externa (SKlm_EL) e SKlm_EL_X (X é a coordenada espacial); Krigagem Ordinária; Krigagem de Regressão usando elevação como a variável externa (RK_EL) e RK_EL_X; Krigagem com derivada externa e Co-krigagem. Baseado nos resultados apresentados por Zhang e Srinivasan (2009) e Goovaerts (2000) o método escolhido foi o de Krigagem Simples com Diferentes Médias Locais e Elevação como Variável Externa. Uma das diferenças do método em relação à Krigagem Simples, é que neste caso a média não é estacionária e existe o uso da elevação no cálculo da variável primária.

Na Krigagem Simples com Diferentes Médias Locais e Elevação como Variável Externa o resultado é obtido com base na variável auxiliar (elevação) que deve ser conhecida em todos os pontos. Neste modelo são calculados simultaneamente os valores da deriva e do resíduo. Neste método é conhecida a variação da média, $f(y(x)) = m_{ks}^*(x)$, com base na variável auxiliar, como é o caso da estimação da precipitação em que a altitude ($y(x)$) é conhecida em todos os pontos, sendo os valores residuais dados pela equação 1 e os valores a estimar pela equação 2 (Goovaerts, 2000):

$$z_{ksml}(x) - m_{ks}^* = \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i^{ks}(x) [z(x_i) - m_{ks}^*(x_i)] \quad (1)$$

$$z_{ksml}(x) = f(y(x)) + \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i^{ks}(x) r(x) \quad (2)$$

onde, $r(x)$ são os valores residuais $r(x) = z(x_i) - f(y(x))$, não espacialmente relacionados, e $\lambda_i^{ks}(x)$ os pesos obtidos da resolução do sistema de krigagem.

Quando se pretende aplicar métodos geoestatísticos de interpolação, alguns parâmetros precisam ser definidos. Para modelos de semivariograma a plataforma apresenta apenas o modelo esférico ativado. Os valores do 'lag size' e 'lag number' foram obtidos de forma automática no *software* ArcGis, e são de 3076 e 10 respectivamente.

O método foi aplicado em três diferentes arranjos dos pontos de monitoramento de chuva: a) três estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras e Campo Alegre); b) quatro estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras, Campo Alegre, e Rio Novo); c) o terceiro é a junção das três estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras e Campo Alegre) com a adição de cinco estações com dados estimados por satélite. Estes dados de satélite são fornecidos pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), e foram obtidos a partir do site: <http://globalweather.tamu.edu/>, onde o arquivo já está no formato dos dados de entrada para o PCP SWAT.

Por fim, a escolha do melhor arranjo é baseada na comparação das simulações feitas pelo SWAT com os dados observados de vazão.

3.2.4 Estimativa da vazão

A estimativa das vazões, tanto para o exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho, quando para o ponto Rio Negrinho Montante foram feitas a partir da confecção da curva-chave para cada seção de controle, considerando a relação Cota x Vazão. O método utilizado foi do dos Mínimos Quadrados, dado pela equação potencial:

$$Q = a(h - h_0)^n \quad (3)$$

onde, Q é a vazão (m^3/s); a , h_0 e n são constantes; e h a cota da água (m).

Para o cálculo da curva-chave do exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho, foram utilizados os dados coletados por Malutta (2012) (Anexo A) com um intervalo de cotas de 0,78m a 4,98m e vazões 0,78 m^3/s a 49,10 m^3/s (15 medições) (Figura 11b). Já para o cálculo na estação Rio Negrinho Montante, foram utilizados os dados de resumo de descarga disponíveis no site do HidroWeb, no intervalo de cota de 0,2m a 4,25m e vazões de 0,82 m^3/s a 29,92 m^3/s (30 medições) (Figura 11a). As equações para cada seção de controle, feitas pelo *software* GRAFCHAV são:

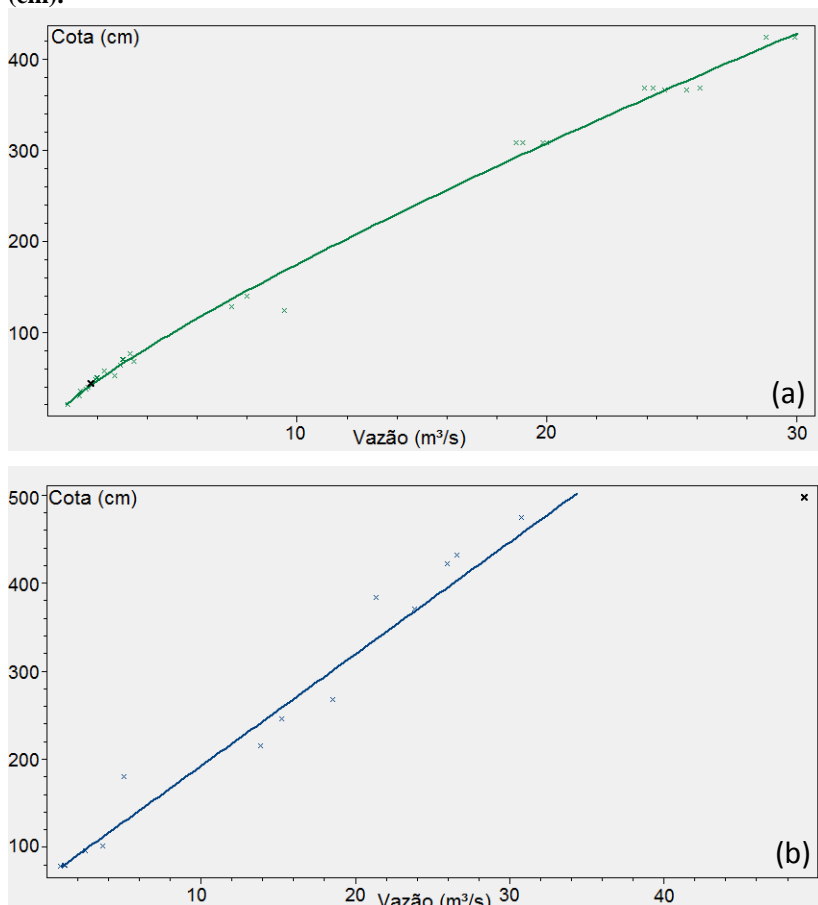
Exutório:

$$Q = 7,8306(h - 0,66)^{1,0029} \quad (4)$$

Rio Negrinho Montante:

$$Q = 5,0001(h + 0,01)^{1,2293} \quad (5)$$

Figura 11 – Forma gráfica da curva-chave para o ponto Rio Negrinho Montante (a) e para o exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho (b). Onde o eixo x são os valores observados e vazão (m^3/s) e o eixo y as cotas (cm).



3.2.5 *Separação dos escoamentos*

Neste estudo, a vazão foi separada em duas partes: escoamento superficial e escoamento de base, utilizando-se da ferramenta automática de separação de escoamentos proposta por Arnold et al,

(1995) o método matemático *Automated Base Flow Filter*. A técnica utilizada pelo autor é a proposta por Nathan e McMahon (1990):

$$q_t = \frac{\beta q_{t-1} + (1 + \beta)}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (6)$$

onde, qt é o valor filtrado da vazão no tempo t (m³/s); β é um parâmetro constante do filtro (0,925); e Qt é a vazão no tempo t (m³/s).

O filtro é ‘passado’ pelos dados originais da vazão três vezes, em geral cada passo resulta em uma porcentagem menor do escoamento de base em relação à vazão. O escoamento de base (b_t) é dado por:

$$b_t = Q_t - q_t \quad (7)$$

A constante ou coeficiente de recessão é a inclinação da reta de recessão de um hidrograma, sendo a parte do decaimento do fluxo quando a vazão é proveniente de fontes subterrâneas (Costa e Bacellar, 2009). Dentro do programa *BaseFlow Filter* a constante de recessão é determinada pela equação:

$$\alpha = \frac{1}{N} * \ln \left(\frac{Q_N}{Q_o} \right) \quad (8)$$

onde, N é o número de dias para o começo da recessão (dias); Q_N é o valor da vazão no dia N (mm); e Q_o é a vazão no início da recessão (mm).

3.2.6 *Evapotranspiração Potencial*

O cálculo da Evapotranspiração Potencial (PET) foi realizado pelo método de Penman-Monteith (Allen et.al., 1989; ASCE, 1990) no software REF-ET (*Reference Evapotranspiration Calculation Software*) citado por FAO e ASCE (2008). Os dados de entrada necessários foram: data (dia, mês e ano), hora, temperatura, velocidade do vento, unidade relativa do ar, radiação, latitude e longitude, altura dos equipamentos de

medição, elevação da estação de monitoramento. A equação geral do cálculo da evapotranspiração potencial é dada por:

$$ET_0 = \left(\frac{\Delta(R_n - G) + k_{time} \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) / \lambda \quad (9)$$

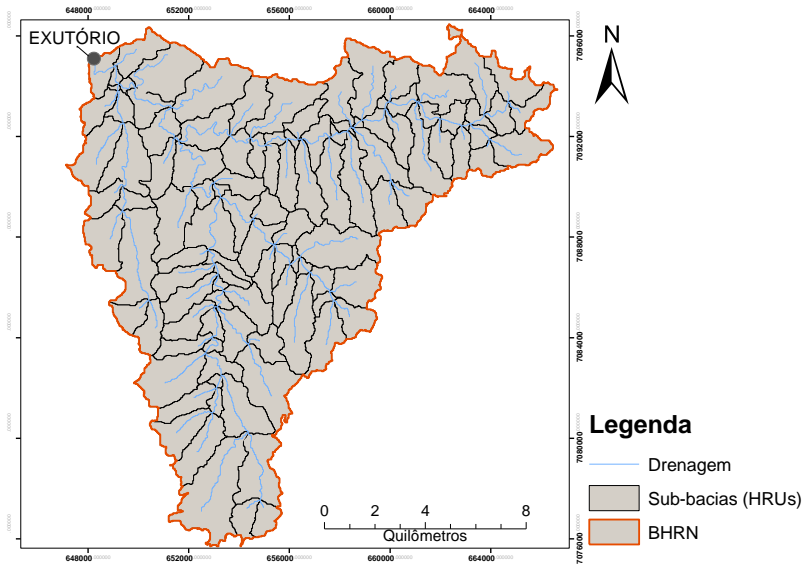
onde, ET_0 é a evapotranspiração potencial (mm/dia); Δ é o gradiente de declividade da curva de pressão de vapor de saturação contra temperatura (kPa/°C); R_n é o saldo de radiação (MJ.m⁻²/dia); G é a densidade do fluxo de calor no solo (MJ.m⁻²/dia); K_{time} constante que depende da escala de tempo utilizada; ρ_a densidade média do ar em pressão constante (kg.m⁻³); c_p calor específico do ar (MJ.kg⁻¹/°C); $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência medida (kPa); r_a e r_s são as resistências totais da cobertura e aerodinâmica (sm⁻¹); γ constante psicrométrica (kPa°C⁻¹); λ é o calor latente de vaporização (MJ/kg).

3.3 MODELO SWAT

Os componentes simulados pelo modelo incluem hidrologia, meteorologia, erosão, crescimento de plantas/culturas, gestão do uso da terra e nutrientes. A área de estudo é dividida em sub-bacias, as quais são subdivididas em uma ou mais Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) com homogeneidade dos usos e tipos de solo, e características topográficas, o balanço hídrico em cada HRU é composto por quatro volumes de armazenamento: neve, perfil do solo, aquíferos superficiais e profundos. No presente trabalho cada HRU corresponde exatamente a uma sub-bacia (117 sub-bacias ao total) (Figura 12).

Os principais componentes hidrológicos do SWAT incluem: precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, percolação e escoamento superficial. A simulação hidrológica realizada pelo modelo é dividida em duas fases: terrestre e de propagação do ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico simulado pelo é baseado na equação do balanço hídrico (equação 10):

Figura 12 – Delimitação das sub-bacias e HRUs para a bacia hidrográfica do Rio Negrinho.



$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (10)$$

onde, SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_0 é a quantidade inicial de água no solo (mm), t é o tempo (dias), R_{day} é a precipitação total diária no dia t (mm), Q_{sup} o escoamento superficial no dia t (mm), E_a é a evapotranspiração total diária no dia t (mm), W_{seep} é a quantidade de água que entra e é armazenada no solo no dia t , e Q_{gw} é a vazão de retorno no dia t (mm).

3.3.1 Escoamento superficial

Volume do escoamento superficial

No SWAT o escoamento superficial pode ser estimado a partir de precipitação diária ou sub-diária. Neste estudo, o escoamento superficial foi estimado a partir de precipitação diária com o método Curva-Número do *Soil Conservation Service* (SCS). O parâmetro Curva-

Número (CN) é um método baseado em dados da relação entre a intensidade de chuva, condições da superfície da terra, e volume do escoamento superficial sendo o valor de CN uma função do uso e ocupação do solo, das condições hidrológicas, do grupo hidrológico e condições de umidade inicial do solo. O valor de CN esta compreendido entre 0 e 100 (valor adimensional), correspondendo a zero para uma bacia de condutividade hidráulica infinita e cem á uma bacia totalmente impermeável. Este modelo é dado pela equação:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (11)$$

onde, Q_{surf} o escoamento superficial total (mm), R_{day} é a precipitação total (mm), I_a é a abstração inicial que abrange o armazenamento, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial (mm) e S é o parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro de retenção S varia espacialmente durante as mudanças do tipo de solo, uso do solo, manejo e declividade e de forma temporal em função das alterações no conteúdo de água no solo. A retenção é definida como:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (12)$$

onde, CN é o valor da Curva-Número para o dia.

O CN é função da permeabilidade, do uso e da condição inicial de umidade do solo. A abstração inicial (I_a) é considerada igual a $0,2S$, onde o escoamento só irá ocorrer se $R_{day} > I_a$. A equação 13 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{(R_{day} + 0,8S)} \quad (13)$$

O SCS obteve curvas que correlacionam a precipitação com o escoamento de várias sub-bacias para a padronização dessas curvas, e

números adimensionais foram estabelecidos para as camadas Curva Número, ou CN's. O USDA – SCS define três condições de umidade antecedente: CN1, condição seca (ponto de murcha); CN2, condição de umidade média; e CN3 condição úmida (capacidade de campo). Os valores tabelados encontram-se na condição CN2. Os valores de CN1 e CN3 são calculados a partir do valor de CN2 da seguinte forma:

$$CN1 = CN2 - \frac{20(100 - CN2)}{(100 - CN2 + \exp[2,533 - 0,0363 * (100 - CN2)])} \quad (14)$$

$$CN3 = CN2 * \exp[0,00673 * (100 - CN2)] \quad (15)$$

O parâmetro de retenção (S) pode ser calculado de duas maneiras: com a retenção variando de acordo com a disponibilidade hídrica ou; em função da evapotranspiração das plantas. Quando o S varia de acordo com a disponibilidade de água no solo, utiliza-se a seguinte equação:

$$S = S_{max} \left(1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 * SW)]} \right) \quad (16)$$

onde, S é o parâmetro de retenção no dia (mm); S_{max} é o valor máximo que o parâmetro de retenção pode assumir no dia (mm); SW é a quantidade de água que pode existir em todo perfil excluindo a quantidade de água existente no ponto de murcha permanente (mmH₂O); e w_1 e w_2 são coeficientes de forma. O valor S_{max} é calculado resolvendo a equação 11 utilizando o CN1.

Os coeficientes de forma w_1 e w_2 são dados pelas equações:

$$w_1 = \ln \left(\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC \right) + w_2 * FC \quad (17)$$

$$w_2 = \frac{\left[\ln \left(\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC \right) - \ln \left(\frac{SAT}{1 - 2,54 * S_{max}^{-1}} - SAT \right) \right]}{SAT - FC} \quad (18)$$

onde, w_1 é o primeiro coeficiente de forma; w_2 é o segundo coeficiente de forma; FC é a quantidade de água na sua capacidade de campo (mmH_2O); S_3 é o parâmetro de retenção para o CN3; S_{max} é o parâmetro de retenção para o CN1; SAT é a quantidade de água quando o solo esta completamente saturado (mmH_2O); e 2,54 é o valor quando o CN é igual a 99.

O valor de CN ajustado de acordo com a umidade existente no solo é calculado rearranjando a equação 12 e inserindo o parâmetro de retenção calculado para a condição de umidade no dia:

$$CN = \frac{25400}{(S + 254)} \quad (19)$$

Vazão de pico do escoamento superficial

A vazão de pico é a máxima taxa de escoamento superficial que ocorre em um evento de precipitação. Ela é um indicador do potencial erosivo de uma precipitação é usado para estimar a perda de sedimento na bacia. O SWAT calcula a vazão de pico por meio do método racional modificado:

$$Q_{peak} = \frac{C * i * A}{3,6} \quad (20)$$

onde, Q_{peak} é a vazão de pico (m^3/s); C é o coeficiente de escoamento superficial, calculado pela razão entre vazão e precipitação no dia; i é a intensidade da precipitação (mm/h); A é a área da sub-bacia (km^2); e 3,6 um fator de conversão de unidade.

O tempo de concentração é calculado somando-se o tempo necessário para a água percorrer do ponto mais remoto da bacia até o canal (t_{ov}) com o tempo necessário para a água se deslocar do ponto mais elevado do canal até o exutório (t_{ch}). O tempo de concentração é dado pela expressão:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (21)$$

onde, t_{conc} é o tempo de concentração na bacia (h); t_{ov} tempo de escoamento terrestre (h); e t_{ch} tempo de escoamento no canal (h).

A equação 21 desenvolvida fica:

$$t_{conc} = \frac{0,62 * L * n^{0,75}}{A^{0,125} * spl_{ch}^{0,375}} \quad (22)$$

onde, t_{conc} é o tempo de concentração na bacia (h); L é o comprimento do canal deste o ponto mais alto da sub-bacia até o exutório (km); n é o coeficiente de rugosidade de *Manning* para sub-bacia; A é a área da sub-bacia (km²); spl_{ch} é a declividade do canal (m/m).

A intensidade da chuva é a chuva média que cai durante o tempo de concentração, sendo calculada:

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad (23)$$

onde, i é a intensidade da chuva (mm/h); R_{tc} é o volume de chuva que cai durante o tempo de concentração (mmH₂O); t_{conc} é o tempo de concentração na sub-bacia (h).

A fração que representa o quanto choveu durante o período de concentração (α_{tc}), pode ser calculada a partir da relação entre R_{tc} e R_{day} , pela equação:

$$R_{tc} = \alpha_{tc} * R_{day} \quad (24)$$

O modelo estima a fração que representa o quanto choveu durante o período de concentração (α_{tc}) em função da fração de chuva que cai no evento de 30 minutos de maior intensidade, utilizando a seguinte equação:

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp\left[2 - t_{conc} * \ln(1 - \alpha_{0,5})\right] \quad (25)$$

onde, $\alpha_{0,5}$ é a fração de chuva que cai na chuva de 30 minutos de maior intensidade.

Por fim, a vazão de pico é reescrita como:

$$Q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} * Q_{surf} * A}{3,6 * t_{conc}} \quad (26)$$

Atraso do escoamento superficial

Quando o tempo de concentração da sub-bacia é mais que um dia, apenas uma parte do escoamento superficial chega ao canal principal no mesmo dia em que foi gerado. Deste modo, o modelo possui um componente que armazena o escoamento superficial para dar um ‘lag’ em porções do escoamento. A quantidade de escoamento superficial disponibilizado ao canal principal é calculada por:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) * \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (27)$$

onde, Q_{surf} é a quantidade de escoamento superficial descarregada no canal principal no dia (mmH_2O); Q'_{surf} é a quantidade de escoamento superficial gerado na sub-bacia no dia (mmH_2O); $Q_{surf,i-1}$ é o escoamento superficial armazenado devido ao lag do dia anterior (mm); $surlag$ é o coeficiente de retardo (lag); e t_{conc} é o tempo de concentração (h).

Perdas de Transmissão

A equação para a previsão do volume de escoamento após as perdas de transmissão é:

$$vol_{Q_{surf,f}} \begin{cases} 0 \\ a_x + b_x * vol_{Q_{surf,i}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} vol_{Q_{surf,i}} \leq vol_{thr} \\ vol_{Q_{surf,i}} \geq vol_{thr} \end{cases} \quad (28)$$

onde, $vol_{Q_{surf,i}}$ é o volume de escoamento depois das perdas de transmissão (m^3); a_x é a interseção de regressão para um canal de

comprimento L e largura W (m^3); b_x é a inclinação da regressão para um canal de comprimento L e largura W ; $vol_{Q_{surf,i}}$ é o volume de escoamento antes das perdas de transmissão (m^3); vol_{thr} é o volume limite para um canal de comprimento L e largura W (m^3), que é calculado por:

$$vol_{thr} = -\frac{a_x}{b_x} \quad (29)$$

Sendo a equação da vazão de pico reescrita como:

$$Q_{peak,f} = \frac{1}{(3600 * dur_{flw})} * [a_x - (1 - b_x) * vol_{Q_{surf,i}}] + b_x * Q_{peak,i} \quad (30)$$

onde, $Q_{peak,f}$ é o volume de pico após as perdas de transmissão (m^3/s); dur_{flw} é a duração do fluxo (h); $Q_{peak,i}$ é o volume de pico antes de contabilizar as perdas (m^3/s); dur_{flw} é a duração do fluxo (h), calculada por:

$$dur_{flw} = \frac{Q_{surf} * A}{3,6 * Q_{peak}} \quad (31)$$

A fim de calcular os parâmetros de regressão para canais de diferentes comprimentos e larguras, um canal de unidade é definido como canal de comprimento (L) = 1 km e largura (W) = 1m. Os parâmetros deste canal de unidade são calculados:

$$k_r = -2,22 \ln \left(1 - 2,6466 \frac{K_{ch} * dur_{flw}}{vol_{Q_{surf,i}}} \right) \quad (32)$$

$$a_r = -0,2258 * K_{ch} * dur_{flw} \quad (33)$$

$$b_r = \exp(-0,4905 * K_{ch}) \quad (34)$$

onde, k_r é o fator de decaimento ($m^{-1}km^{-1}$); K_{ch} é a condutividade hidráulica do canal (mm/h).

Os parâmetros de recessão são:

$$b_x = \exp(-k_r * L * W) \quad (35)$$

$$a_x = \frac{a_r}{(1 - b_r)} * (1 - b_x) \quad (36)$$

3.3.2 Umidade do solo

A capacidade de água disponível é calculada pela subtração da fração da água existente no ponto de murcha permanente da água presente na capacidade de campo.

$$AWC = FC - WP \quad (37)$$

onde, AWC é a umidade do solo disponível para planta; FC é a umidade do solo na capacidade de campo; WP é a umidade do solo no ponto de murcha permanente.

O modelo estima o volume da umidade do solo no ponto de murcha permanente para cada camada de solo:

$$WP_{ly} = 0,40 \frac{m_c * \rho_b}{100} \quad (38)$$

onde, WP_{ly} é a umidade do solo no ponto de murcha indicado como uma parte do volume do solo; m_c é a porcentagem de argila na camada de solo referente (%); e ρ_b é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$). A umidade do solo na capacidade de campo é calculada por:

$$FC_{ly} = WP_{ly} + AWC_{ly} \quad (39)$$

onde, FC_{ly} é a umidade do solo na capacidade de campo; e AWC_{ly} é a capacidade de água disponível na camada de solo.

3.3.3 Águas Subterrâneas

O modelo simula dois tipos de aquíferos em cada sub-bacia. O primeiro é um aquífero não confinado (lençol freático), o segundo do tipo profundo confinado. O balanço hídrico de aquíferos rasos é representado por:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (40)$$

onde, $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero em um dia i (mmH_2O); $aq_{sh,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero no dia anterior (mmH_2O); $w_{rchrg,sh}$ é a quantidade de água que entra no aquífero raso no dia i (mmH_2O); Q_{gw} é a vazão subterrânea, ou fluxo de base, no canal principal no dia i ; w_{revap} é a quantidade de água que retorna da zona vadosa (mmH_2O); $w_{pump,sh}$ é a quantidade de água que vai do aquífero para superfície.

3.3.4 Fluxo Lateral

No fluxo ou escoamento lateral a precipitação percola verticalmente até encontrar uma camada impermeável. A água então acumula sobre a camada impermeável, formando uma zona de água saturada. Essa zona é a fonte de água para o escoamento lateral no subsolo. O volume drenável de água armazenada na zona saturada por unidade de área é:

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 * H_o * \phi_d * L_{hill}}{2} \quad (41)$$

onde, $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável da água armazenada na zona saturada por unidade de área (mmH_2O); H_o é a espessura saturada normal, indicada como um fração da espessura total (mm/mm); ϕ_d é a porosidade drenável do solo (mm/mm); L_{hill} é o comprimento do declive (m); e 1000 é o fator de correção de metros para milímetros.

Para a aproximação da onda cinemática no escoamento lateral saturado e assumido que a linha de escoamento na zona saturada e paralela ao imite impermeável e o gradiente hidráulico igual a

declividade da base. A formula para estimar o escoamento sub-superficial é:

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2 * SW_{ly,excess} * K_{sat} * slp}{\phi_d * L_{hill}} \right) \quad (42)$$

onde, Q_{lat} é a quantidade de água que escoo sub-superficialmente (mm); K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm/h); slp é a declividade média da sub-bacia (m/m).

Em bacias com um período de concentração maior que um dia, somente uma parte do fluxo lateral alcançará o cabal principal no dia em que foi gerado. Uma vez calculado o fluxo lateral, a quantidade de fluxo liberada para o canal principal é:

$$Q_{lat} = (Q'_{lat} + Q_{latstor,i-1}) * \left[1 - \exp\left(\frac{-1}{TT_{lag}}\right) \right] \quad (43)$$

onde, Q'_{lat} é a quantidade do fluxo lateral gerado na sub-bacia em um determinado dia (mmH_2O); $Q_{latstor,i-1}$ é o fluxo lateral armazenado no dia anterior (mmH_2O); e o TT_{lag} é o tempo de duração do fluxo lateral (dias).

3.4 SWAT CUP

O programa integra cinco procedimentos de calibração e análise de incertezas semiautomáticos: *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2); *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*; *Parameter Solution*; *Mark chain Monte Carlo*; e *Particle Swarm Optimizatio* para a interface do modelo SWAT. O método usado para este estudo foi o SUFI2.

Segundo Rouholahnejad et al. (2012) o SUFI2 utiliza o método do hipercubo latino para definição dos valores de parâmetros e o processo inicia com uma faixa de valores determinada pelo usuário. Cada valor de parâmetro selecionado é substituído dentro do projeto do SWAT, esse processo é realizado quantas vezes o usuário achar necessário. Abbaspour et al, (2006) recomenda que o número de simulações seja relativamente grande 500-1000. Para este estudos foram feitas 2001 iterações, que é o máximo que o método escolhido realiza dentro da plataforma.

O processo de calibração dentro da plataforma SUFI2 consiste em:

Passo 1: definição dos limites máximos e mínimos para cada parâmetro a ser calibrado, assume-se então que todos os parâmetros são distribuídos uniformemente dentro da região delimitada pelos valores mínimos e máximos, por meio da método hipercubo latino

Passo 2: é a definição da função objetivo, a qual é condição para a decisão dos parâmetros finais na simulação. Para este estudo são usadas como função objetivo as fórmulas estruturais no NSE (*Nash-Sutcliffe efficiency*) e Pbias (*Percent bias*).

Passo 3: a sensibilidade dos parâmetros em relação a cada simulação é calculada através do sistema de regressão linear múltipla, a qual faz a regressão dos valores gerados pelo hipercubo latino em relação aos da função objetivo. Em seguida um teste é realizado para ranquear a significância de cada parâmetro, as medidas de sensibilidade são estimativas das alterações resultantes das variações dos parâmetros.

Paralelo a todos estes processos, o SUFI2 calcula as incertezas relativas ao modelo conceitual, parâmetros e valores observados. A incerteza da simulação é quantificada por 95% da incerteza de previsão (95PPU), que é definida pelo *p-factor* (equação 12). O 95PPU é calculado entre 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa da variável de saída, obtida pelo hipercubo latino. Outra medida de quantificação da eficiência da análise de incerteza e calibração, é o *r-factor*, que é a espessura média do 95PPU dividido pelo desvio padrão dos dados observados (equação 44). O *p-factor* varia entre 0 e 100%, enquanto o *r-factor* entre 0 e infinito. Um *p-factor* igual a 1 e *r-factor* igual a 0, são simulações que correspondem exatamente aos dados observados

O *p-factor* é a porcentagem de observações enquadradas pelo 95PPU, dada pela equação:

$$\overline{dx} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (X_u - X_L) l \quad (44)$$

onde, \overline{d} é a distância entre os limites superior e inferior de 95PPU; k o número de pontos de dados observados; X_u percentil correspondente a 97,5% da distribuição cumulativa de cada ponto simulado; X_L percentil correspondente a 2,5% da distribuição cumulativa de cada ponto simulado.

A fim de obter uma melhor medida para \bar{d} , o *r-factor* é calculado por:

$$r - factor = \frac{\overline{dx}}{\partial x} \quad (45)$$

onde, ∂_x é o desvio padrão da variável medida x .

Por fim, a sensibilidade dos parâmetros pode ser feita de duas maneiras: análise de sensibilidade global e *one-at-a-time*. A análise de sensibilidade global é calculada através do sistema de regressão linear múltipla, a qual faz a regressão dos valores gerados pelo hipercubo latino em relação aos da função objetivo. A *one-at-a-time* mostra a sensibilidade de uma variável, se todos os outros parâmetros permanecem constantes. O valor da sensibilidade de cada parâmetro pode ser dado pelo *p-value*, onde quanto mais próximo de zero, mais sensível é o parâmetro.

3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

A maior parte dos cenários de calibração e validação é discutida por Klemes (1986), ele considera os problemas gerais na validação e calibração de modelos hidrológicos e propõe uma estrutura hierárquica de testes (*Simple-Sample Test*, *Differential Split-Sample Test*, *Proxy-Catchment Test*) o objetivo é dar segurança de que os modelos não vão ser aplicados em estudos além de suas capacidades. Autores como Xu (1999); Li et al. (2012) e Muleta (2012) aplicaram e discutiram a importância desta estrutura de testes, Arnold et al. (2012) também recomenda sua utilização em projetos gerados no modelo SWAT.

3.5.1 *Análise de sensibilidade*

O excesso de parâmetros é um problema conhecido modelos hidrológicos, especialmente em modelos distribuídos e semi-distribuídos. Análises de sensibilidade são métodos existentes para reduzir o número de parâmetros destes modelos no processo de calibração (Lenhart et al., 2002).

A escolha dos parâmetros mais sensíveis foi feita a partir de revisão bibliográfica, onde foram selecionados os mais comumente

utilizados e já testados pelos usuários do modelo (Lenhart et al., 2002; van Griensven et al., 2005; Arnold et al., 2012; Malutta, 2012; Muleta, 2012) (Tabela 3). Os parâmetros selecionados fazem parte dos processos: escoamento superficial e tempo de concentração; umidade do solo; águas subterrâneas; evapotranspiração e fluxo lateral. Por fim, foram escolhidos sete parâmetros para calibração mensal e quinze para calibração diária.

Tabela 3 - Relação dos parâmetros determinados pela análise de sensibilidade, bem como suas descrições, intervalos e valores máximos e mínimos (range).

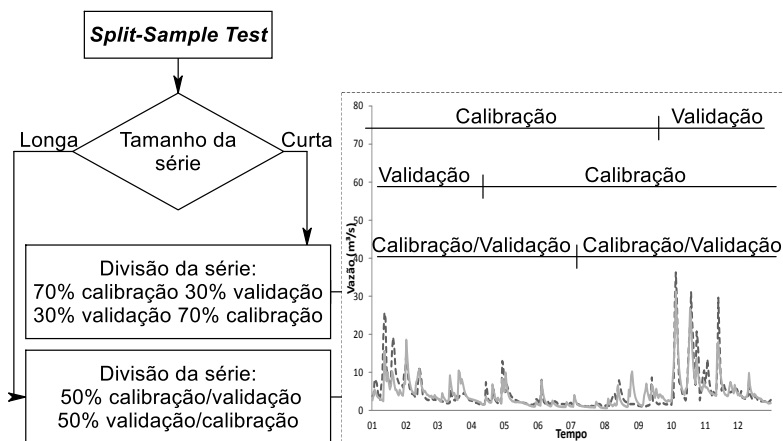
Parâmetro	Processo	Descrição	Intervalo	Range
CN2		Curva Número inicial para condição de umidade do solo II	Mensal/ Diário	35-85
SURLAG		Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto	Diário	0,05- 24
CH_N2	Escoamento superficial e tempo de concentração	Coefficiente de <i>Manning</i> para o canal principal	Diário	-0,01- 0,3
CH_N1		Coefficiente de <i>Manning</i> para os canais tributários	Diário	0,01- 30
CH_K2		Condutividade efetiva do canal (mm h^{-1})	Diário	-0,01- 500
CH_K1		Condutividade efetiva dos canais tributários (mm h^{-1})	Diário	0-300
SOL_AWC	Umidade do solo	Armazenamento de água no solo ($\text{mmH}_2\text{O mmsolo}^{-1}$)	Mensal/ Diário	0-1

ESCO		Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo	Mensal/ Diário	0-1
CANMAX	Evapo-transpiração	Quantidade de água interceptada (mm)	Diário	0-100
GW_ DELAY		Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	Mensal/ Diário	0-500
GW_QMN		Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)	Mensal/ Diário	0-5000
GW_ REVAP	Águas subterrâneas	Coeficiente de ascensão de água à zona de saturação	Mensal/ Diário	0,02-0,2
RCHRG_ DP		Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm)	Mensal/ Diário	0-1
SLSOIL		Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (m)	Diário	0-150
LATTIME	Fluxo lateral	Escoamento lateral (dias)	Diário	0-180

3.5.2 Descrição dos cenários de calibração e validação

Split-Sample Test: é o teste clássico, onde a série de dados é dividida em dois segmentos, um para calibração e outro para validação. Se a série for suficientemente longa para representar as diferentes condições climáticas (anos secos e úmidos), então deve ser dividida em partes iguais (50/50) e cada parcela deve ser usada tanto para validação quanto para calibração. Porém se ela não for suficientemente longa, o que é o caso deste estudo (2003 até 2012) deve ser adotado o seguinte procedimento: os primeiros 70% da série para calibração e os 30% finais para validação; e os últimos 70% para calibração e os 30% iniciais para validação (Figura 13). O modelo será julgado como válido para a área, somente se os dois resultados das calibrações forem similares e os resultados das validações aceitáveis.

Figura 13 - Demonstração da divisão da série histórica de vazões para o Split-Simple Test.



Differential Split-Sample Test: Este teste deve ser aplicado quando se pretende usar o modelo para simulações de vazões em bacias monitoradas e cenários sobre mudanças no clima. O requisito básico para este teste é um período de dados (precipitação e vazão) longo o suficiente para serem identificadas diferentes condições históricas, como períodos úmidos e secos. O teste consiste na calibração de anos úmidos e validação em anos secos, e vice-versa. Se o modelo for aplicável, ele

deve mostrar a habilidade de transitar de forma eficiente entre todos os cenários.

O *Proxy-Catchment Test* será capaz de dar confiabilidade ao modelo em ser usado em uma bacia diferente daquela para a qual foi criado, dando maior validade geral ao uso do SWAT. Xu, 1999 ainda relata que o teste tem potencial de verificar a adequação do modelo em prever impactos na mudança do uso do solo. Para isso, devem ser escolhidas duas bacias de uso do solo semelhante, o modelo deve ser calibrado em uma bacia e validado em outra (Figura 14). Novamente, se os resultados forem satisfatórios, o modelo pode ser julgado apto às simulações nesta bacia.

Figura 14 – Demonstração da divisão da bacia hidrográfica do Rio Negrinho para o *Proxy-Catchment Test*.



3.5.2.1 Separação dos anos secos e úmidos

É de extrema importância que os períodos de calibração e validação sejam representativos das variações climáticas que acontecem na bacia, isto é, a ocorrência de anos secos e úmidos deve ser garantida (Klemes, 1986; Gan et al., 1997; Arnold et al., 2012 e Zhang et al., 2015). O método escolhido para a divisão dos anos secos e úmidos foi o utilizado por Muleta (2012). O primeiro passo foi o cálculo da média anual das chuvas (Figura 15) e vazões (Figura 16) para todo o período

de dados. A Figura 17 apresenta o coeficiente de escoamento para definição dos anos secos e úmidos. A escolha final dos anos foi baseada no desvio que os valores têm em relação à média anual. Os anos com valores abaixo da média (2003, 2004, 2005, 2006, 2007) foram considerados anos secos, os anos acima da média (2008, 2009, 2010, 2011, 2012) são anos úmidos.

Figura 15 – Chuva anual de cada ano para a divisão dos anos secos e úmidos. A linha tracejada representa a média geral de todos os anos.

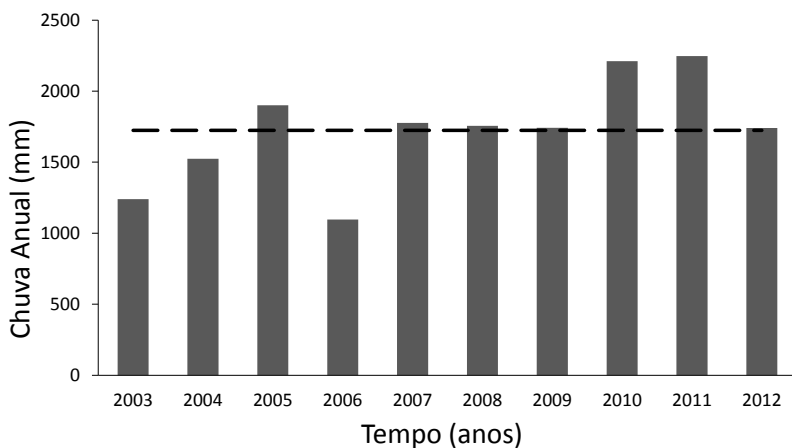


Figura 16 - Vazão anual de cada ano para a divisão dos anos secos e úmidos. A linha tracejada representa a média geral de todos os anos.

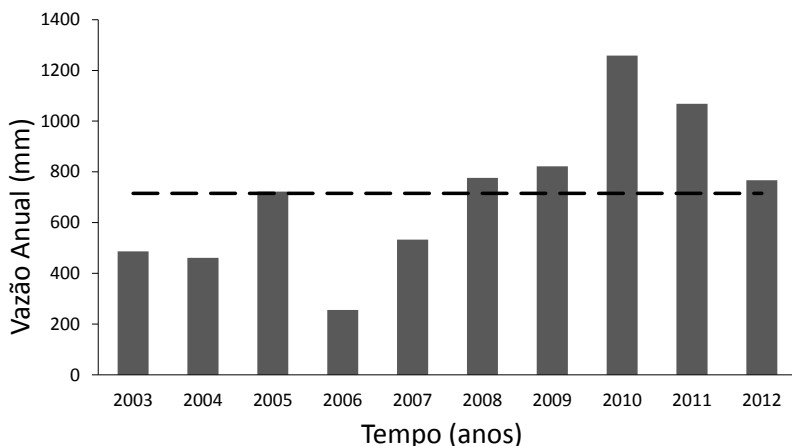
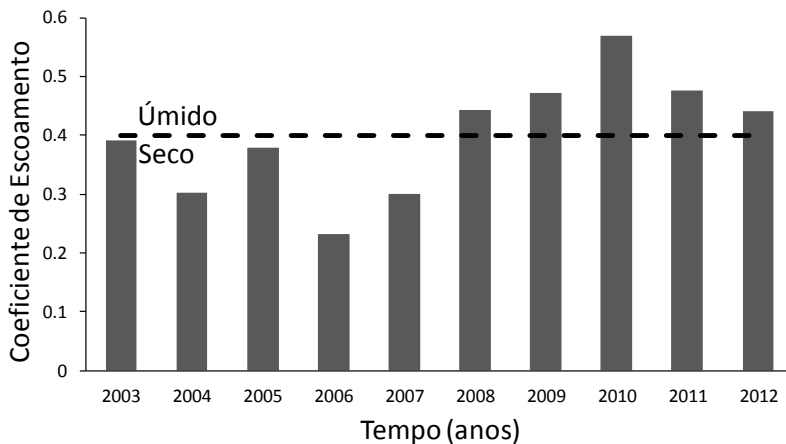


Figura 17 - Coeficiente de escoamento anual usada na divisão dos anos secos e úmidos. A linha tracejada representa a média geral de todos os anos.



3.6 FUNÇÕES OBJETIVO

O bom ajuste ou não, de um modelo em relação aos dados observados, pode ser avaliado a partir de indicadores estatísticos. Tais indicadores devem ser comumente usados e recomendados em literatura (Moriasi et al., 2007). Dois indicadores são usados para identificação do ajuste do SWAT neste trabalho: o coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE); e *Percent Bias* (Pbias). Com o uso desses indicadores será possível identificar os ajustes de altas vazões e super ou subestimação geral da amostra. As vazões simuladas em relação às observadas também serão analisadas de forma gráfica.

O coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* (NSE) (Nash e Sutcliffe, 1970) é o indicador estatístico de uso mais comum entre os usuários do SWAT. Para um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados o valor de NSE deve ser igual a 1, quando o resultado for ≤ 0 significa que o uso da média dos dados observados é melhor que a simulação feita. O NSE (equação 46) apresenta um melhor ajuste na representação de vazões altas (Arnold et al., 2012; Moriasi et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q^{mean})^2 \right]} \quad (46)$$

O *Percent bias* proposto por Gupta et al. (1999), avalia a tendência que a média dos valores simulados tem em relação aos observados. O valor ideal do Pbias (equação 47) é de 0 (zero), valores positivos indicam uma subestimação do modelo, e valores negativos superestimação (Moriasi et al., 2007).

$$Pbias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right] * 100 \quad (47)$$

onde, n é o número total de observações; Q_i^{obs} é a vazão observa; Q_i^{sim} a vazão simulada; e Q^{mean} a média da vazão observada, para as três equações.

As faixas de valores usadas para o julgamento satisfatório ou não do modelo SWAT, serão as propostas por Moriasi et al. (2007): com o $NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$ o modelo pode ser julgado como satisfatório.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um dos principais desafios na aplicação de modelos hidrológicos como o SWAT, em larga escala no Brasil, é a escassez de dados de entrada e monitoramentos de curto prazo. Por esses motivos algumas perguntas são frequentemente realizadas pelos usuários: Existe um período mínimo de simulação? Depois de calibrado, as saídas do modelo podem ser usadas para simulação de cenários de previsão? (Bonumá et al., 2014). A fim de responder estas questões, a metodologia proposta foi aplicada a bacia hidrográfica do Rio Negro (BHRN).

4.1 INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA

O SWAT é uma ferramenta amplamente utilizada, no entanto, a metodologia dentro do programa para representar a distribuição espacial da precipitação (Thiessen) tem limitações. A atribuição do valor de chuva para cada sub-bacia do pluviômetro mais próxima de seu centro não garante que o objeto selecionado seja o mais representativo da precipitação na bacia (Gálvan et al., 2014).

O método da Krigagem Simples com Diferentes Médias Locais e Elevação como Variável Externa, dentro da plataforma PCP SWAT, foi aplicado em três diferentes arranjos dos pontos de monitoramento: a) três estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras e Campo Alegre); b) quatro estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras, Campo Alegre, e Rio Novo); c) o terceiro é a junção das três estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras e Campo Alegre) com a adição de cinco estações com dados estimados por satélite. Por fim, a escolha do melhor arranjo (quatro estações interpoladas), foi baseada na comparação das calibrações de cada ano de simulação feito no SWAT, com os dados medidos de vazão.

A primeira distribuição das estações de monitoramento foi escolhida por serem as três mais próximas à bacia, e por oferecerem o maior número de dados. As Figuras 18a e 18b apresentam a espacialização da chuva por sub-bacias na BHRN, na primeira está a representação para as três estações colocadas diretamente no SWAT (Thiessen), a segunda as três estações interpoladas, pelo método da Krigagem Simples com Diferentes Médias Locais e Elevação como Variável Externa. A Figura 18c apresenta a forma gráfica da quantidade de chuva em cada sub-bacia. A Tabela 4 apresenta os valores para as calibrações mensais das estações interpoladas pelo método escolhido, e não interpoladas, ou seja, com a entrada dos dados brutos dentro do

SWAT. Para melhor visualização dos resultados, estão sublinhados dentro das tabelas os melhores valores das calibrações para cada ano em relação aos dois métodos.

Figura 18 – Quantidade de chuva por sub-bacia para o primeiro arranjo de três estações. 16a três estações não interpoladas; 16b três estações interpoladas; 16c forma gráfica da quantidade de chuva por sub-bacia.

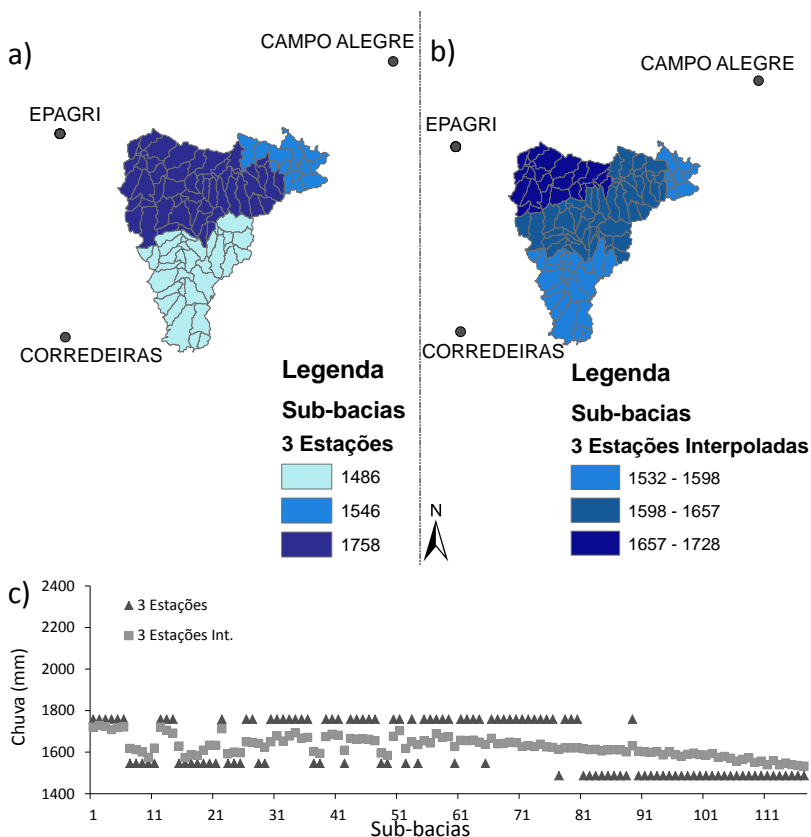


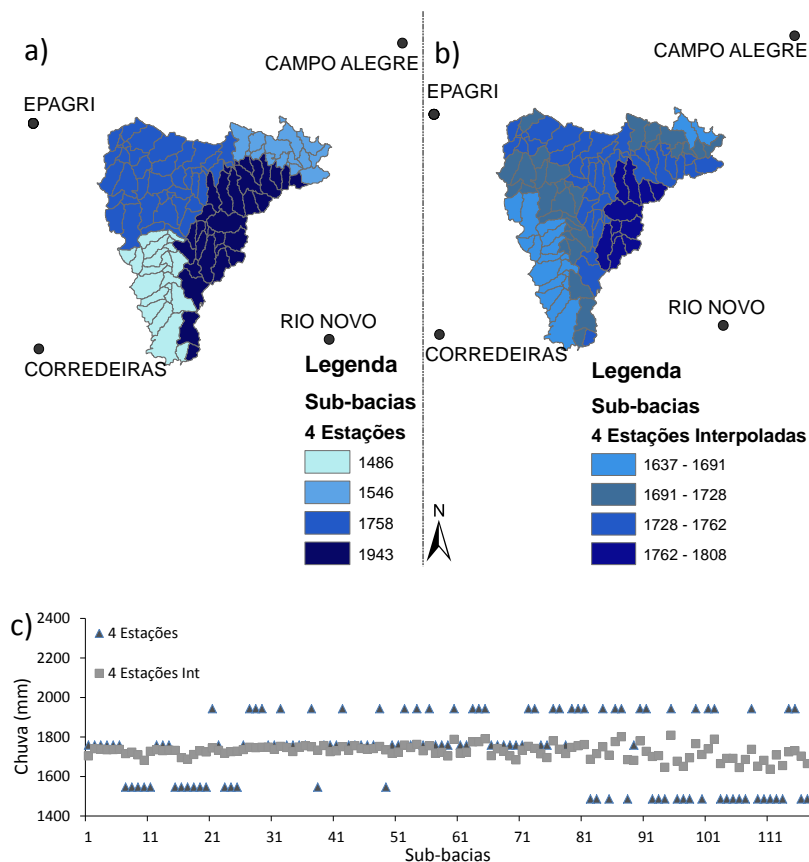
Tabela 4 – Comparação dos dados mensais (NSE e Pbias) para as simulações com e sem interpolação das três estações pluviométricas.

Ano	Sem interpolação		Com interpolação	
	NSE	Pbias	NSE	Pbias
2003	0,08	20,1	<u>0,13</u>	<u>17,2</u>
2004	0,76	2,2	<u>0,78</u>	<u>1,4</u>
2005	<u>0,78</u>	2,1	0,77	<u>1,6</u>
2006	<u>0,55</u>	<u>3,1</u>	0,49	12,4
2007	<u>0,51</u>	<u>3,4</u>	0,43	23,0
2008	0,74	12,6	<u>0,79</u>	<u>6,8</u>
2009	0,67	<u>24,0</u>	<u>0,71</u>	25,6
2010	0,37	30,5	<u>0,38</u>	<u>26,1</u>
2011	<u>0,86</u>	<u>5,6</u>	0,80	8,3
2012	0,36	29,7	<u>0,53</u>	<u>21,5</u>
2003-2009*	0,61	<u>7,6</u>	<u>0,62</u>	7,8
2010-2012*	0,51	<u>6,8</u>	<u>0,52</u>	10,0

*são os valores de calibração (2003 a 2009) e validação (2010 a 2012) para a série dividida em dois períodos.

O segundo arranjo das estações aconteceu com a adição de uma estação a montante da bacia hidrográfica do Rio Negrinho. A estação Rio Novo, possui menos dados de chuva que as outras três estações utilizadas anteriormente, mas esperava-se que com a adição desta a montante da bacia, houvesse um melhor ajuste dos volumes e picos nas simulações. As Figuras 19a e 19b apresentam a espacialização da chuva por sub-bacias, na primeira esta a representação para as quatro estações não interpoladas, a segunda as quatro estações interpoladas. A Figura 19c apresenta a forma gráfica da quantidade de chuva em cada sub-bacia. A Tabela 5 apresenta os resultados para as calibrações com a composição de quatro estações.

Figura 19 - Quantidade de chuva por sub-bacia para o segundo arranjo de quatro estações; 17a quatro estações não interpoladas; 17b quatro estações interpoladas; 17c forma gráfica da quantidade de chuva por sub-bacia.



O terceiro arranjo foi realizado para saber qual a eficiência da adição de dados obtidos por satélite para simulações na bacia de estudo. Se neste caso, era melhor a utilização de um número menor de estações, com medições em campo, ou se os resultados seriam mais eficientes com mais estações, porém algumas com seus dados estimados por satélite. Neste caso a calibração foi realizada somente para os dados interpolados (Tabela 6). As Figuras 20a apresenta a espacialização da chuva por sub-bacias na BHRN para o terceiro arranjo, a Figura 20b apresenta a forma gráfica da quantidade de chuva em cada sub-bacia.

Tabela 5 – Comparação dos dados mensais (NSE e Pbias) para as simulações com e sem interpolação das quatro estações pluviométricas.

Ano	Sem interpolação		Com interpolação	
	NSE	Pbias	NSE	Pbias
2003	0,21	20,1	<u>0,42</u>	<u>14,4</u>
2004	0,67	3,0	<u>0,71</u>	<u>1,2</u>
2005	<u>0,80</u>	<u>-0,7</u>	0,74	-2,6
2006	<u>0,67</u>	4,4	0,66	<u>3,4</u>
2007	0,74	<u>0,0</u>	<u>0,75</u>	0,9
2008	0,86	-1,1	<u>0,87</u>	<u>0,8</u>
2009	<u>0,87</u>	<u>4,7</u>	0,85	10,8
2010	<u>0,61</u>	6,4	0,59	<u>0,9</u>
2011	<u>0,91</u>	<u>-0,2</u>	<u>0,91</u>	1,6
2012	0,56	<u>-0,1</u>	<u>0,65</u>	-2,9
2003-2009*	0,69	20,3	<u>0,70</u>	<u>9,0</u>
2010-2012*	0,60	18,4	<u>0,63</u>	<u>2,6</u>

Quando comparamos os valores dos três arranjos, a distribuição dois (quatro estações) é a mais eficiente, tanto para os valores não interpolados como para os valores interpolados. Os resultados inferiores da terceira distribuição, estão associados aos volumes das chuvas serem superiores aos medidos em campo (2031,7 mm/ano, enquanto para os outros dois arranjos a pluviosidade média anual é de 1674,7 mm) (Figuras 16c, 17c e 18b). Resultados similares foram relatados por Dile e Srinivasan (2014), que comparou simulações no modelo SWAT com dados estimados por satélite e com dados obtidos a partir de monitoramento. Onde as simulações feitas com os dados de satélite apresentaram médias anuais muito superiores aos dados medidos em campo, resultando em valores elevados dos componentes do balanço hídrico (e.g. escoamento superficial), em uma avaliação geral, os resultados de NSE foram melhores para os dados monitorados.

Quando a comparação é feita entre os valores mensais interpolados ou não, para as quatro estações, as simulações para os dois modos podem ser consideradas satisfatórias ($NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25$), porém com uma melhora para os dados interpolados, principalmente quando a calibração é feita por períodos (2003 a 2009 para calibração, e

2010 a 2012 para validação). Assumiu-se então, os dados das quatro estações (EPAGRI, Corredeiras, Campo Alegre e Rio Novo) interpoladas, para as simulações realizadas neste estudo.

Figura 20 - Quantidade de chuva por sub-bacia para o terceiro arranjo de oito estações; 18a oito estações não interpoladas; 18b forma gráfica da quantidade de chuva por sub-bacia.

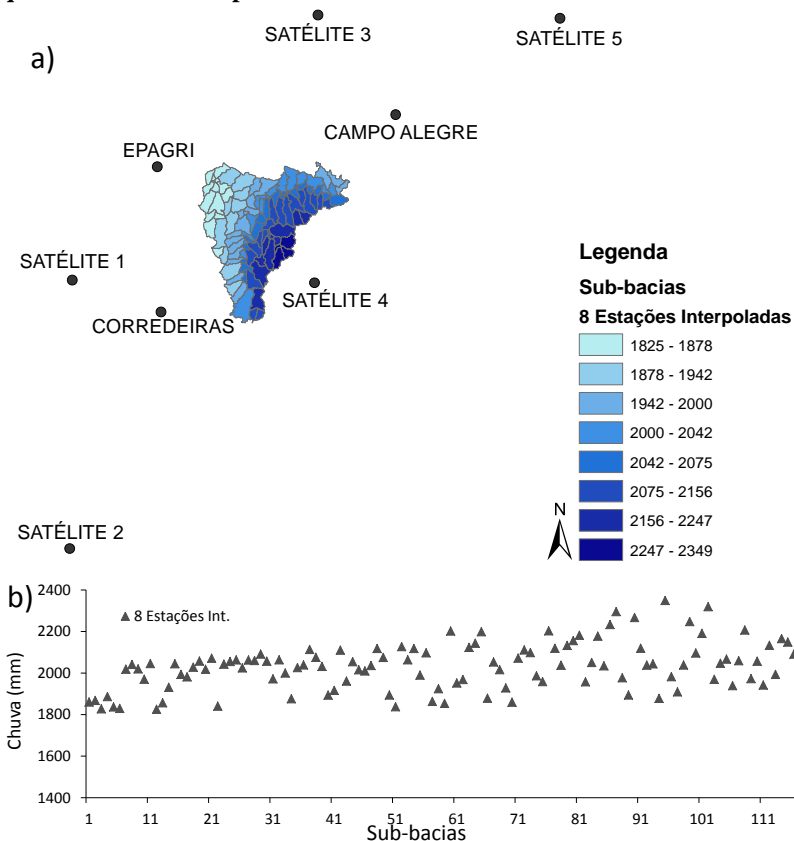


Tabela 6 - Comparação dos dados mensais (NSE e Pbias) para as simulações com as oito estações pluviométricas interpoladas.

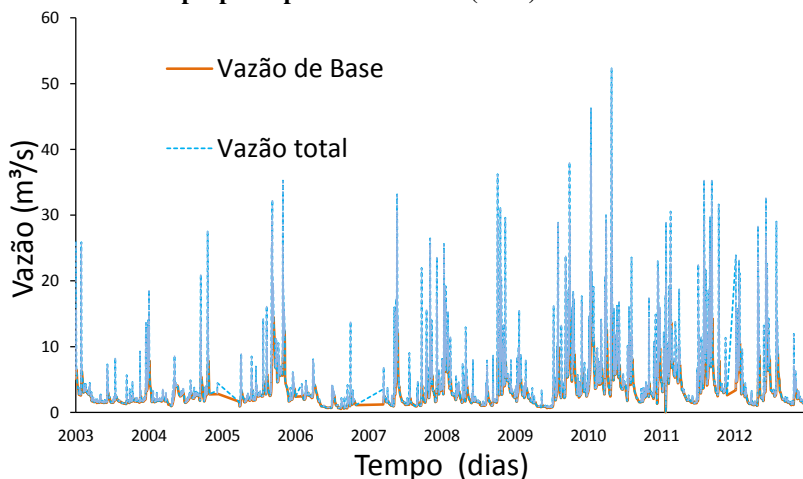
Ano	NSE	Pbias
2003	-0,66	34,5
2004	-1,67	41,2
2005	0,31	38,0
2006	-1,76	31,0
2007	-0,18	46,1
2008	0,59	-31,7
2009	0,43	40,9
2010	0,52	-25,3
2011	0,64	4,0
2012	0,35	29,7
2003-2009*	0,21	42,3
2010-2012*	-0,62	52,7

*são os valores de calibração (2003 a 2009) e validação (2010 a 2012) para a série dividida em dois períodos.

4.2 SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS

Uma das etapas para análises hidrológicas é a separação do escoamento em: escoamento superficial e de base (Arnold et al., 1995). Utilizou-se o filtro automático *Base Flow Filter* para separação dos escoamentos. O filtro foi aplicado aos dados de nível, que foram transformados em vazão a partir da curva-chave elaborada, disponíveis de 2002 a 2013 (Figura 21). Sendo assim, foi possível estimar melhor o fator ALPHA_BF (constante de recessão do escoamento de base), utilizado pelo SWAT para o cálculo do escoamento de base. O resultado final foi de um ALPHA_BF igual 0,0609 o qual foi utilizado como valor fixo em toda a bacia. Esta constante é um índice que avalia de forma direta a resposta da vazão subterrânea em função da recarga, onde valores próximos de 0,1 são representativos de locais com resposta lenta às recargas.

Figura 21 - Separação dos escoamentos realizado pelo filtro automático *Base Flow Filter* proposto por Arnold et al. (1995).

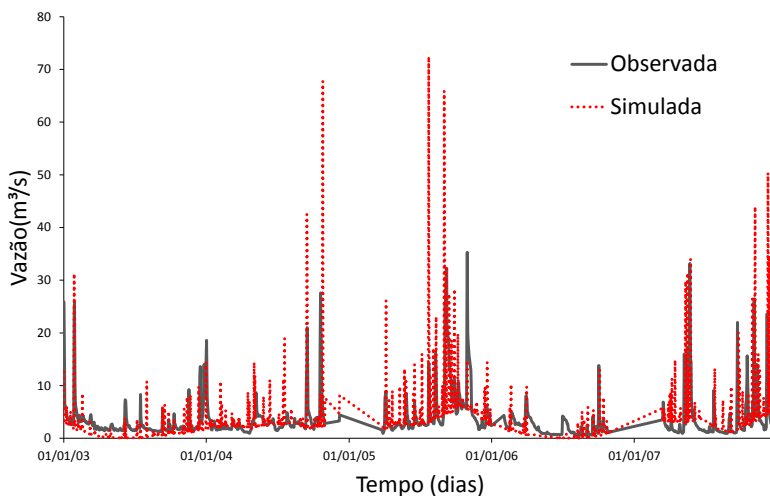


4.3 SIMULAÇÃO SEM CALIBRAÇÃO

Com todos os ajustes anteriores finalizados, a simulação com o modelo SWAT foi realizada no período de 2003 a 2012, além de quatro anos de aquecimento do modelo (1999 a 2002). Como esperado a primeira simulação não foi considerada satisfatória ($NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$), levando assim, a necessidade das análises de sensibilidade, calibração e validação do modelo.

A verificação da qualidade da simulação foi feita a partir da comparação dos valores diários de vazão, entre os anos 2003 e 2007, para a sub-bacia 13, a qual é localização da estação Rio Negrinho Montante (dentro deste projeto do SWAT). Os resultados para os coeficientes de NSE e Pbias, como dito anteriormente, foram insatisfatórios, com um NSE de -0,72 e Pbias de 56,5. Na Figura 22 é possível observar visualmente que o modelo não conseguiu simular as vazões corretamente para a bacia, os picos simulados foram muito maiores e em mais quantidade que os observados.

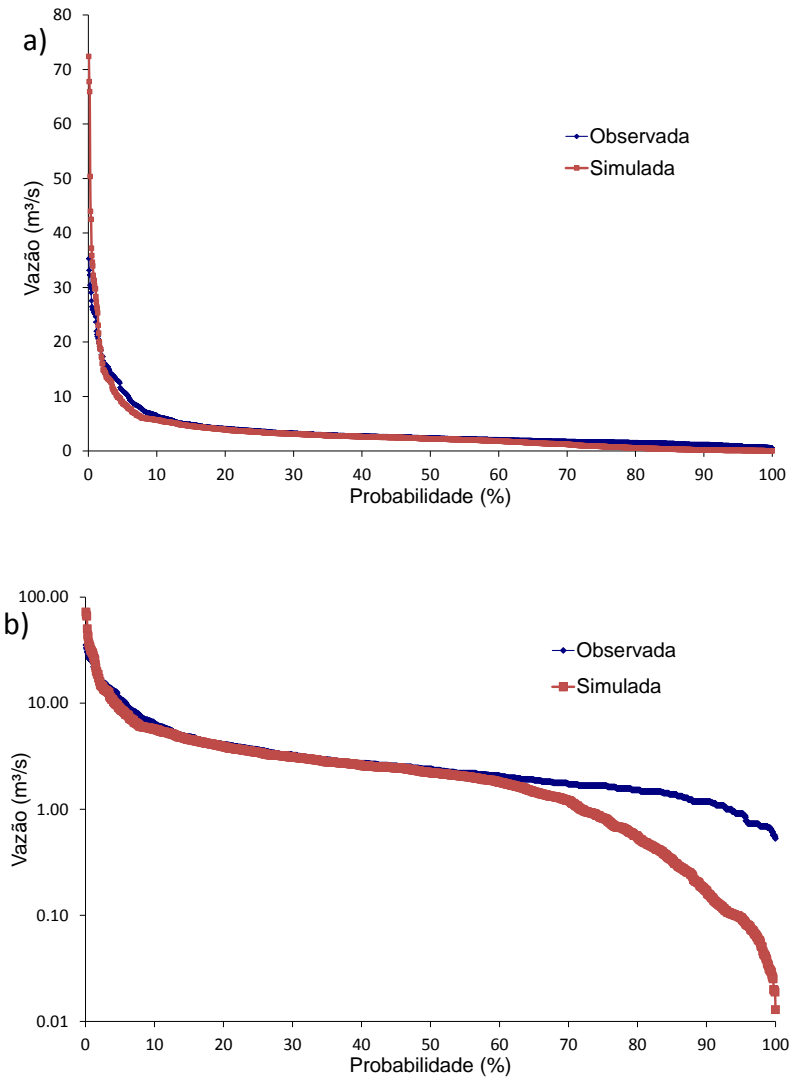
Figura 22 - Simulação bruta com o modelo SWAT para os dados diários de 2003 a 2007.



Curva de permanência é outro método disponível na avaliação visual de vazões. Consiste na distribuição de vazões em um intervalo de tempo definido (e.g. diário, mensal e anual) que representa a relação entre a magnitude e frequência com que essas vazões são iguais ou superadas em um dado período.

A Figura 23 apresenta as curvas de permanência para a bacia, tanto em sua escala normal dos valores como logarítmica, a escala *log* é justamente para ter uma melhor percepção do ajuste das baixas vazões. Na Figura 23a percebe-se que a quantidade e a magnitude dos picos simulados é superior aos observados, onde o valor máximo simulado é $72 \text{ m}^3/\text{s}$ e o observado $35 \text{ m}^3/\text{s}$ (tal como é possível verificar na Figura 15). Quando analisamos a curva na escala *log* (Figura 23b) identifica-se um problema na simulação das vazões mais baixas, onde o modelo apresentou uma tendência visível em subestimar tais vazões, onde o valor mínimo observado é de $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$ e o simulado de $0,013 \text{ m}^3/\text{s}$. Quanto às vazões médias com probabilidade de ocorrência entre 20% e 50%, o modelo mesmo sem calibração, apresentou um bom ajuste, observado pela sobreposição das curvas.

Figura 23 – Curva de permanência das vazões simuladas (sem calibração) e observadas para bacia hidrográfica do Rio Negrinho nos anos de 2003 a 2007. (a) a curva em escala normal dos valores, e (b) a curva em escala logarítmica.



4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Como já descrito na metodologia, a escolha dos parâmetros mais sensíveis, para realização da calibração, foi feita por meio de revisão bibliográfica. Foram usados dois conjuntos de parâmetros, um para calibração mensal e outro para diária (ver Tabela 2). Portanto, a análise de sensibilidade relatada nesta etapa do trabalho será em relação aos parâmetros anteriormente selecionados. Como existem simulações por períodos e para cada ano separadamente, o ordenamento dos parâmetros é diferente em cada caso. Com o intuito de facilitar a identificação de parâmetros que sejam frequentemente mais sensíveis que outros, foi realizada a média simples de todos os resultados obtidos pelo *p-value*, onde, quanto mais próximo de zero, mais sensível é o parâmetro (Tabela 7).

Tabela 7 – Ordenamento médio da sensibilidade dos parâmetros em relação a todas as simulações diárias.

Parâmetro	<i>p-value</i>
SURLAG	0,0008
CH_N1	0,0422
CN2	0,0433
SLSOIL	0,2105
GW_REVAP	0,2327
RCHRG_DP	0,2441
CH_K1	0,2483
CH_K2	0,3378
GWQMN	0,4738
CH_N2	0,5391
GW_DELAY	0,6667
SOL_AWC	0,6796
CANMX	0,7223
ESCO	0,7242
LAT_TTIME	0,7638

O SURLAG (Coeficiente de retardo do escoamento superficial direto) foi o parâmetro que apresentou maior influência entre todas as simulações diárias. O modelo ‘armazena’ parte do escoamento

superficial, de forma a retardar a entrada de água oriunda do escoamento superficial no canal principal. Dessa maneira, o SURLAG controla a fração da água disponível que irá abastecer diariamente o canal.

Os parâmetros seguintes, o CH_N1 (Coeficiente de Manning para os canais tributários) e CN2 (Valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II), apresentam sensibilidade semelhante. Seguidos pelos SLSOIL (Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial), GW_REVAP (Coeficiente de ascensão de água à zona de saturação), RCHRG_DP (Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo) e CH_K1 (Condutividade efetiva dos canais tributários). Os parâmetros menos sensíveis são: CANMX (Quantidade de água interceptada), ESCO (Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo) e LAT_TTIME (Escoamento lateral) respectivamente. Van Greinsven et al. (2006) ainda alerta que resultados diferentes na sensibilidade dos parâmetros são comuns, devido principalmente as variações no clima, nas propriedades e uso do solo. Assim, cada nova bacia requer uma análise de sensibilidade para selecionar um conjunto de parâmetros a serem utilizados na calibração e/ou análise de incerteza do modelo.

4.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Split-Sample Test

Existem duas hipóteses fundamentais na utilização de modelos hidrológicos, a primeira é que o modelo deve reproduzir razoavelmente o histórico de vazões observadas, e a segunda é que o modelo deve ser capaz de simular condições climáticas diferentes das quais ele foi calibrado (Xu, 1999). O início do processo de calibração e validação do modelo SWAT para bacia hidrográfica do Rio Negrinho se deu, portanto, com o *Split-Sample Test*, separando-se a série total em períodos distintos de calibração e validação. Para o processo mensal, a série foi dividida na estrutura 30-70, e dois arranjos foram feitos: a) os primeiros 70% da série foram destinados à calibração (2003 a 2009) e os últimos 30% a validação (2010 a 2012); b) os primeiros 30% foram destinados à validação (2003 a 2005) e os últimos 70% a calibração (2006 a 2012). Vale ressaltar que com essas divisões, as calibrações compreendem tanto anos secos, quanto anos úmidos. Os resultados obtidos para o intervalo mensal são considerados aceitáveis quando avaliados pelos coeficientes NSE e Pbias, visto que os valores estão dentro da faixa considerada satisfatória ($NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq +25\%$),

portanto para o primeiro arranjo, o SWAT mostrou-se eficaz para simulações mensais na bacia (Tabela 8).

Tabela 8 - Valores de NSE e Pbias para as calibrações e validações mensais pelo método *Split-Sample Test*.

Anos	Tipo	NSE	Pbias (%)
2003-2009	Calibração	0,70	9,0
2010-2012	Validação	0,63	2,6
2006-2012	Calibração	0,73	3,4
2003-2005	Validação	0,55	18,5

As Figuras 24 e 25 apresentam os processos de calibração e validação citados na Tabela 8. Na Figura 24 estão os processos de calibração (2003 a 2009) e validação (2010 a 2012) para a primeira divisão da série, na Figura 25 os processos de calibração (2006-2012) e validação (2003-2005) para o segundo arranjo. O modelo de maneira geral, subestima o cálculo das vazões nos dois arranjos. Os dois cenários de calibração compreendem como é recomendado em literatura, anos secos e úmidos, já nos períodos de validação, o primeiro (2010 a 2012) existem somente períodos úmidos, e no segundo (2003 a 2005) somente secos, e analisando os coeficientes de NSE e Pbias percebe-se, portanto, uma tendência do modelo simular melhor períodos úmidos.

Figura 24 - Processos mensais de calibração (2003 – 2009) e validação (2010 – 2012).

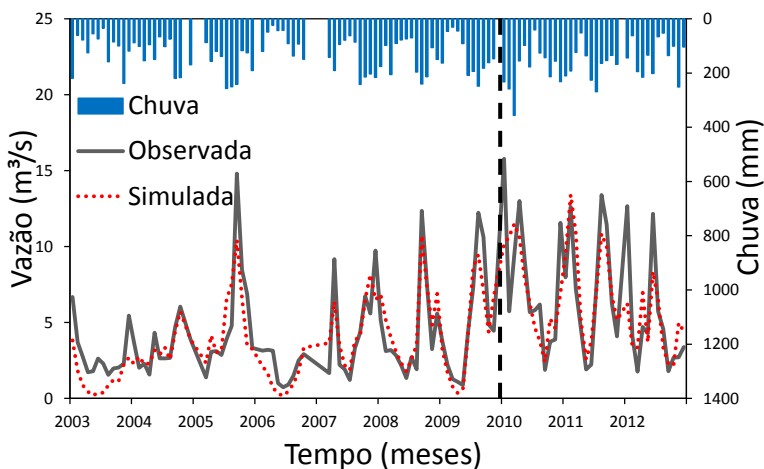
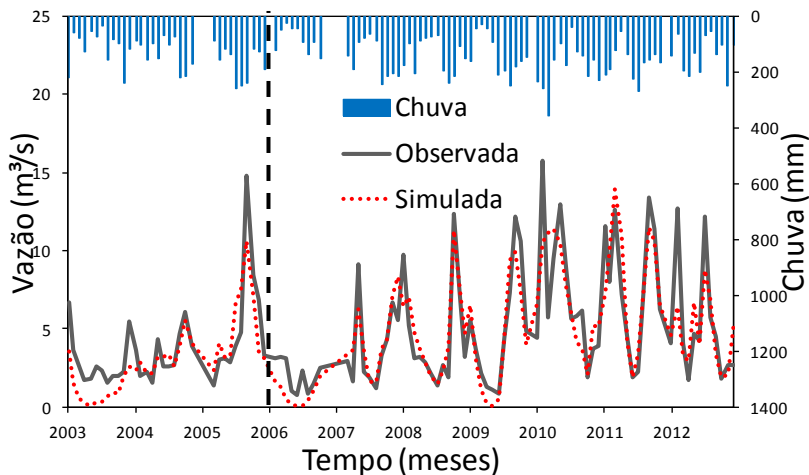


Figura 25 - Processos mensais de calibração (2006 – 2012) e validação (2003 – 2005).



Na Tabela 9 estão apresentados os valores finais dos parâmetros para calibração mensal pelo *Split-Sample Test*.

Tabela 9 – Valores dos parâmetros calibrados para simulação mensal, referente ao *Split-Sample Test*.

Parâmetros	Valores iniciais	Valores finais	
		2003-2009	2006-2012
CN2	72 - 85	72,1 - 85,1	69,6 - 84,5
GW_QMN	0	0	0
GW_REVAP	0,02	0,2	0,12
RCHRG_DP	0,05	0,0082	0,031
SOL_AWC	0,11 - 0,13	0,11 - 0,13	0,11 - 0,13
GW_DELAY	31	37,44	25,27
ESCO	0	1	0,51

O ajuste dos parâmetros é feito sempre em relação a função objetivo escolhida, e o restante dos parâmetros não utilizados na calibração permaneceu com o valor de *default* do modelo. As diferenças nos valores finais dos parâmetros para uma mesma bacia hidrográfica é

discutida por Beven (2001), o autor afirma que podem existir diferentes faixas de valores que possam dar bons resultados, principalmente em modelos cuja quantidade de parâmetros envolvidos nos processos é elevada (“equifinalidade”). Por exemplo, para um modelo que apresenta componentes de infiltração, saturação e evaporação na camada do solo para o cálculo do escoamento superficial, é improvável que apenas um único valor dos parâmetros seja representante de uma simulação aceitável, o fato dos três componentes interagirem entre si, leva a mais de um conjunto de valores de parâmetros aceitáveis. Cicbin et al., 2010 discute a dificuldade de encontrar as melhores combinações e valores ótimos de parâmetros no processo de calibração devido suas variabilidades espaciais e temporais.

Differential Split-Sample Test

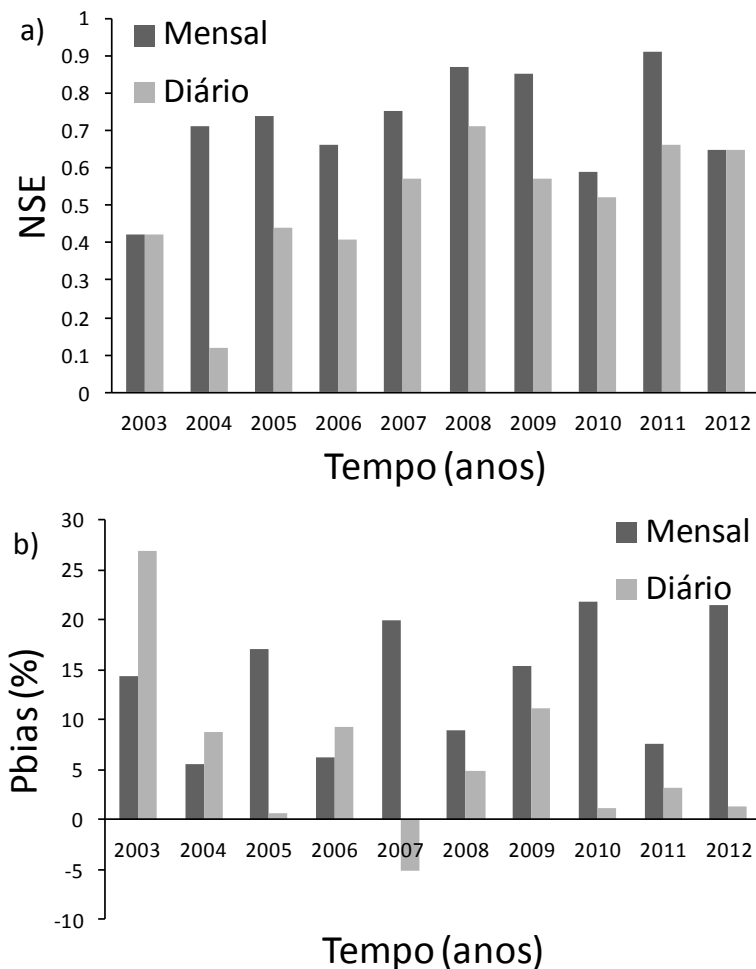
O próximo passo no processo de adequação do modelo SWAT a BHRN é a aplicação do *Differential Split-Sample Test*, consistindo basicamente que um ano calibrado deve ser validado em todos os outros, com o intuito de identificar a capacidade do modelo de se ajustar as diferentes condições climáticas e prever simulações mais eficientes. A Figura 26 apresenta os valores calibrados, diários e mensais, do NSE (Figura 26a) e Pbias (Figura 26b) para todos os anos separadamente. De maneira geral as calibrações mensais apresentam melhores valores dos que as calibrações diárias. Tanto que se julgarmos o SWAT apenas pelos valores de calibração mensal, o modelo apenas teve problemas para a simulação de 2003, onde os valores de NSE (0,4), não estão dentro do padrão estabelecido por Moriasi et al., (2007) ($NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$). Os melhores anos de calibração são 2008 e 2011.

Moriasi et al. (2007) cita algumas razões pelas quais o NSE deve ser um coeficiente de avaliação de modelos hidrológicos: é altamente recomendado pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE); é comumente usado, o que fornece maiores informações sobre seus valores e; estudos mostram que o NSE é a melhor função objetivo no ajuste de um hidrograma (e.g. Sevat e Dezzeter, 1991).

A Tabela 10 apresenta o processo calibração/validação para os intervalos diários e os valores do NSE e PBIAS são apresentados. A ‘entrada’ representa os valores de vazão do referente ano, e a ‘saída’ são os melhores valores calibrados de cada ano. Quando analisados de maneira geral, ou seja, pela comparação dos valores calculados, com o proposto como satisfatório ($NSE \geq 0,5$) os anos úmidos (2008 a 2012) têm calibrações e validações mais eficientes que os anos secos (2003 a 2007). O ano de 2003 não é validado de maneira favorável por nenhum

dos outros anos, porém com a comparação feita dentro do próprio ano, ele é melhor validado pelos anos também de período seco; o mesmo padrão ocorre com o ano de 2004. Os anos de 2005 e 2007 são os melhores anos secos de validação, geralmente bem validados tanto por períodos secos quanto úmidos.

Figura 26 - Valores de NSE (a) e Pbias (b) para as calibrações feitas pelo método *Differential Split-Sample Test*.



O ano de 2006 o mais seco da série, apresenta calibração própria razoável (NSE de 0,44), porém não é bem validado por nenhum outro ano, exceto pelo ano de 2003 (NSE de 0,40). Os anos úmidos se comportam de maneira mais homogênea, onde são bem validados pelos dois períodos, seco e úmido, fato que pode estar associado à escolha da função objetivo (NSE) para calibração automática, a qual prioriza os valores mais altos de vazão.

Em resumo, para este estudo, anos úmidos são bem validados tanto por anos secos como por anos úmidos (sem exceção). Já anos secos nem sempre validam anos secos, e anos úmidos também nem sempre validam satisfatoriamente anos secos. Um ponto interessante, quando se observa os anos mais extremos, 2006 para seco e 2010 para úmido, é que o modelo SWAT apresenta comportamento inferior relativo aos outros anos. Se o propósito é a previsão de cenários úmidos, a série histórica tanto pode ser de anos secos ou úmidos, mostrando assim que o modelo SWAT, quando calibrado automaticamente com a função objetivo NSE, é bem representativo quando pretende trabalhar com vazões altas.

Durante anos secos e úmidos, o valor do Pbias, tende a variar entre os diferentes períodos de autocalibração. O método é muito utilizado quando se pretende avaliar a eficiência da calibração e validação de modelos hidrológicos. Moriasi et al. (2007) também descreve o porque o coeficiente é bem recomendado: tem uso comum na avaliação de erros no balanço hídrico e; capacidade de identificar o baixo desempenho do modelo. Em princípio o modelo SWAT, tem melhor avaliação quando se observa os valores do Pbias. Entre os anos de 2007 a 2012 todos os valores, tanto a calibração quanto a validação, estão dentro da faixa aceitável ($Pbias \leq \pm 25\%$). Os únicos anos que apresentam significativo problema de validação são os anos de 2003 e 2006, nenhum dos outros anos é capaz de proporcionar uma boa validação para esses anos, porém seus valores de calibração validam bem os outros anos. O ano de 2011, ao contrário, é bem validado por todos os anos, mas incapaz de validar adequadamente os anos secos. Quando se analisa a super ou subestimação dos dados simulados de vazão, a validação nos anos secos é sempre subestimada, exceto para o ano de 2007. Nos anos úmidos esse padrão não corre, valores são superestimados para os anos de 2008 e 2011, subestimados para os anos de 2009 e 2010. Portanto, quando se avalia a calibração e validação do SWAT baseando-se na capacidade do modelo de transitar de forma eficiente entre cenários secos e úmidos: os anos úmidos são sempre bem validados, tanto por períodos secos como úmidos. Já os anos secos, nem

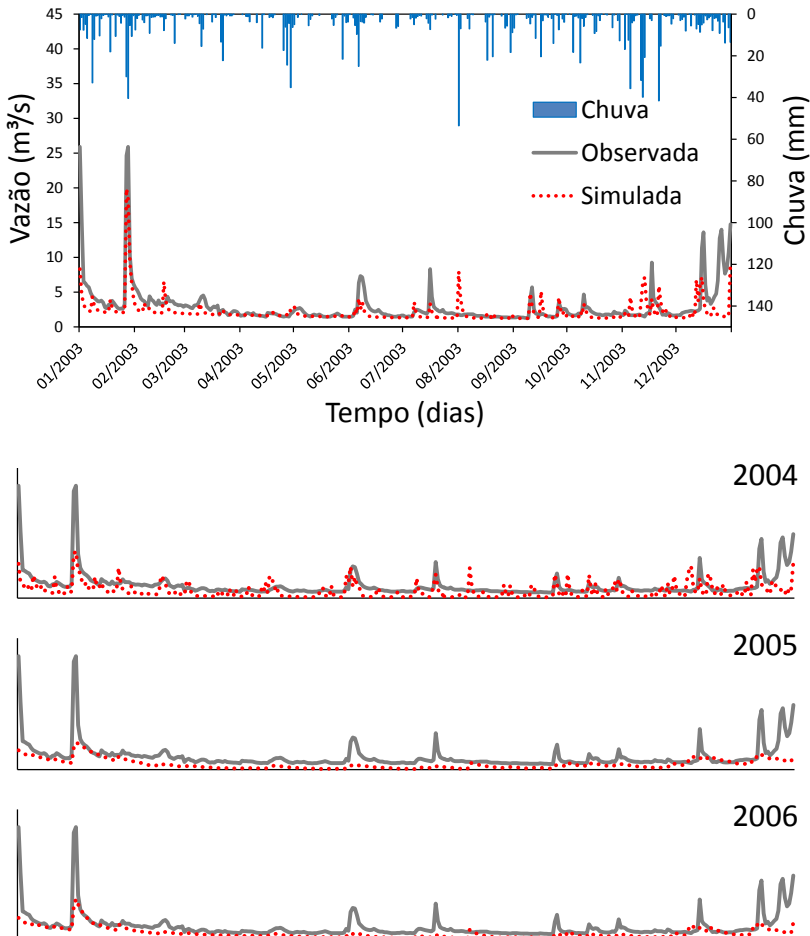
sempre são bem validados por períodos secos e úmidos. Rahbeh, et al. (2013), também aplicaram o método *Differential Split-Sample Test*, em uma bacia canadense de aproximadamente 34 km² e um período de simulação de quatro anos (2004 a 2007). Mesmo com as diferenças no tamanho de bacia e quantidade de dados utilizados, os autores obtiveram resultados semelhantes aos deste estudo, onde o modelo SWAT apresentou melhor desempenho em cenários úmidos.

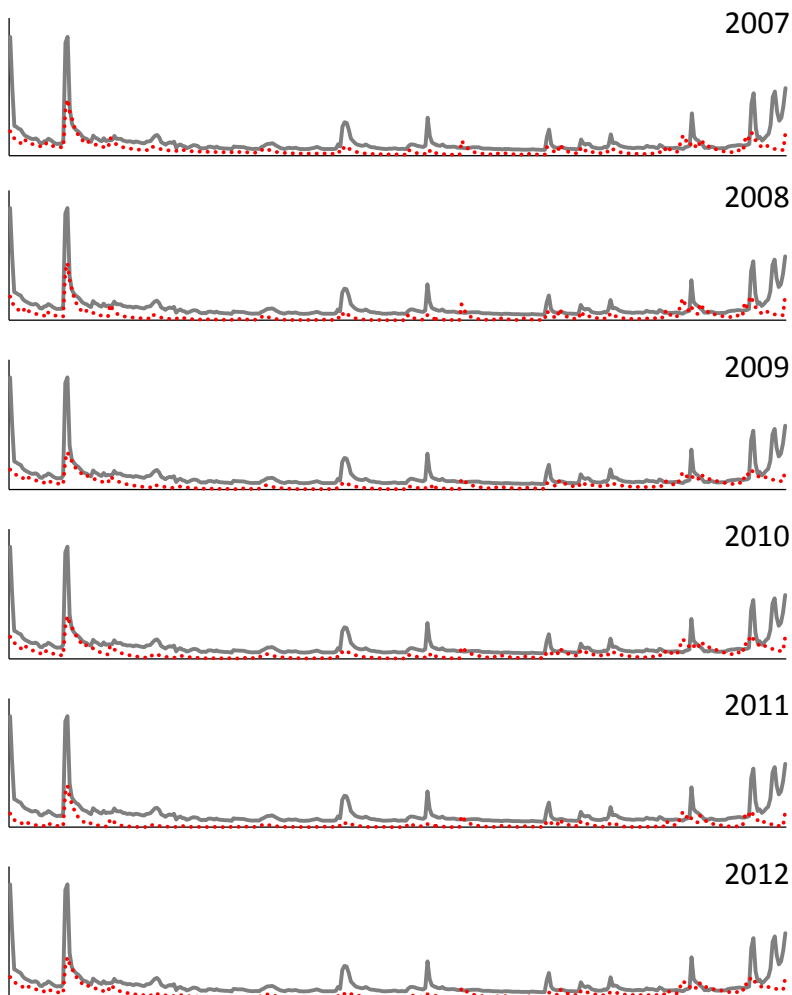
Tabela 10 – Apresentação dos valores diários do NSE e Pbias, na aplicação do *Differential Split-Sample Test*. A ‘entrada’ representa os valores de vazão do referente ano, e a ‘saída’ são os melhores valores calibrados de cada ano. Destacados em cinza os melhores valores de $NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$ para as validações; e sublinhados são os valores calibrados de cada ano.

Entrada (Calibração)	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE
Saída (Validação)	Vazão ano seco / Calibração ano seco										Vazão ano úmido / Calibração ano seco									
	2003	<u>27,0</u>	<u>0,42</u>	8,7	-0,48	<u>4,2</u>	0,02	4,4	0,4	-10,6	<u>0,55</u>	-9,5	0,65	-0,8	0,39	2,8	0,4	-10,9	<u>0,55</u>	-18,0
2004	43,4	0,15	<u>8,8</u>	<u>0,12</u>	-0,1	0,24	47,1	-0,58	-15,1	<u>0,53</u>	-8,1	0,58	5,0	<u>0,54</u>	4,4	0,49	-4,7	<u>0,57</u>	-1,3	<u>0,52</u>
2005	57,4	0,01	<u>11,4</u>	0,06	<u>0,7</u>	<u>0,44</u>	58,5	-0,27	-8,6	0,32	-4,0	0,42	<u>10,5</u>	0,42	8,7	0,31	-4,7	0,45	2,8	0,36
2006	49,2	0,15	<u>3,9</u>	0,01	-0,6	0,41	<u>9,3</u>	<u>0,42</u>	-16,2	0,45	-13,4	<u>0,5</u>	1,1	0,47	-1,3	0,41	-12,9	<u>0,51</u>	-9,1	0,47
2007	53,2	0,17	<u>7,8</u>	-0,14	<u>8,0</u>	0,34	40,1	0,15	-5,2	<u>0,57</u>	-3,2	<u>0,62</u>	9,1	<u>0,52</u>	7,1	0,46	-4,9	<u>0,62</u>	1,7	<u>0,52</u>
	Vazão ano seco / Calibração ano úmido										Vazão ano úmido / Calibração ano úmido									
2008	66,4	0,04	<u>18,1</u>	-0,28	<u>12,6</u>	0,26	72,7	-0,61	-0,5	<u>0,56</u>	<u>4,9</u>	<u>0,71</u>	<u>17,5</u>	<u>0,54</u>	<u>14,6</u>	0,45	1,7	<u>0,66</u>	<u>11,3</u>	<u>0,53</u>
2009	59,7	0,04	<u>3,9</u>	0,01	<u>1,6</u>	0,44	61,4	-0,32	-13,9	0,42	-9,5	0,54	<u>11,2</u>	<u>0,57</u>	4,7	0,42	-9,4	<u>0,57</u>	-0,1	0,49
2010	59,1	0,07	<u>5,3</u>	-0,08	<u>0,9</u>	0,44	62,9	-0,39	-15,0	0,47	-7,7	<u>0,59</u>	<u>6,9</u>	<u>0,53</u>	<u>1,2</u>	<u>0,52</u>	-8,2	<u>0,61</u>	<u>0,5</u>	<u>0,52</u>
2011	80,5	-0,29	61,9	-0,55	40,0	0,21	83,7	-0,99	<u>20,5</u>	0,47	<u>3,3</u>	<u>0,63</u>	<u>16,0</u>	<u>0,53</u>	<u>11,0</u>	0,44	<u>3,1</u>	<u>0,66</u>	<u>8,8</u>	<u>0,54</u>
2012	62,2	0,03	<u>7,1</u>	-0,05	<u>1,6</u>	0,46	66,9	-0,44	-11,9	0,46	-7,7	<u>0,57</u>	<u>7,2</u>	<u>0,53</u>	5,7	0,43	-9,0	<u>0,58</u>	<u>1,3</u>	<u>0,56</u>

A demonstração gráfica do *Differential Split-Sample Test* é feita com os anos de 2003 e 2008 (Figuras 27 e 28). O ano de 2003 um dos anos secos da série, apresenta uma das piores validações. Para o NSE as validações variam de -0,29 a 0,17 mostrando baixíssima ou nenhuma representação dos picos. O único mês que é razoavelmente representado em seu pico é fevereiro. Os valores do Pbias variam entre 43,4 e 80,5, sendo que o último é referente ao ano de 2011, onde a vazão simulada chega a 0 m³/s em alguns dias, o que não é verdadeiro para a bacia.

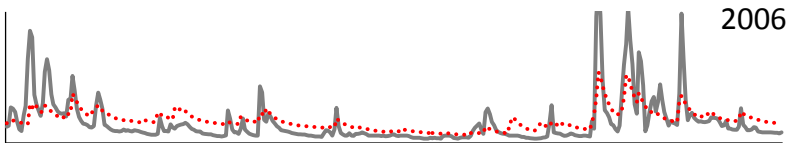
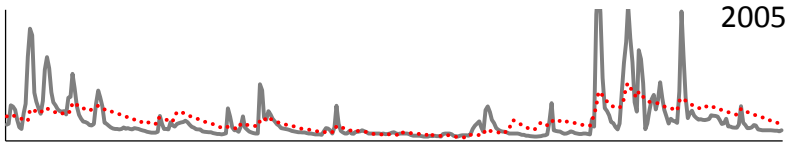
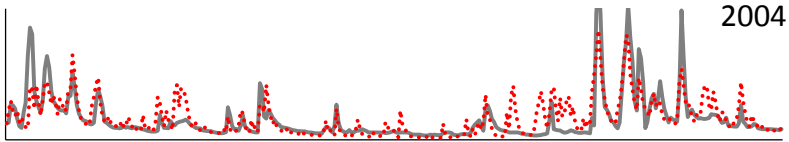
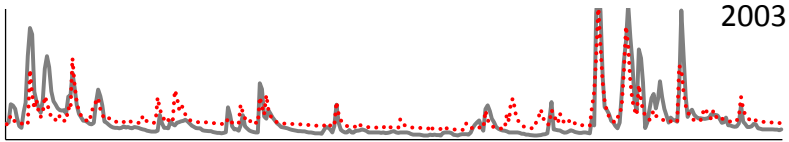
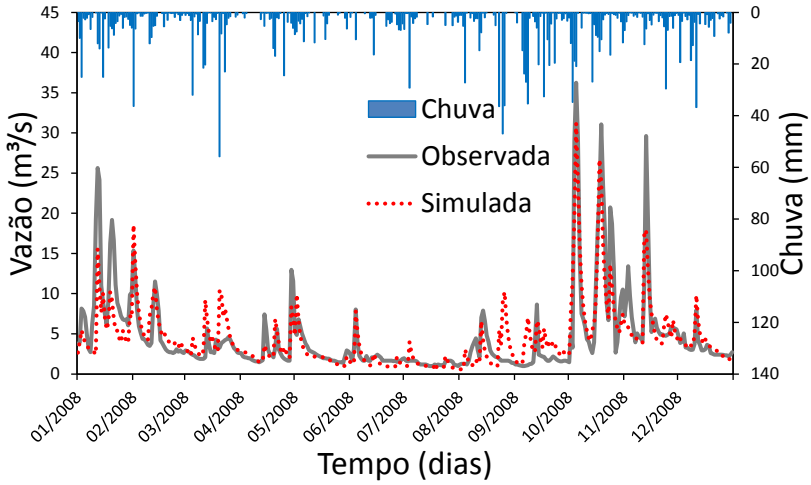
Figura 27 – Aplicação do *Differential Split-Sample Test* para o ano de 2003, com sua calibração e respectivas validações.

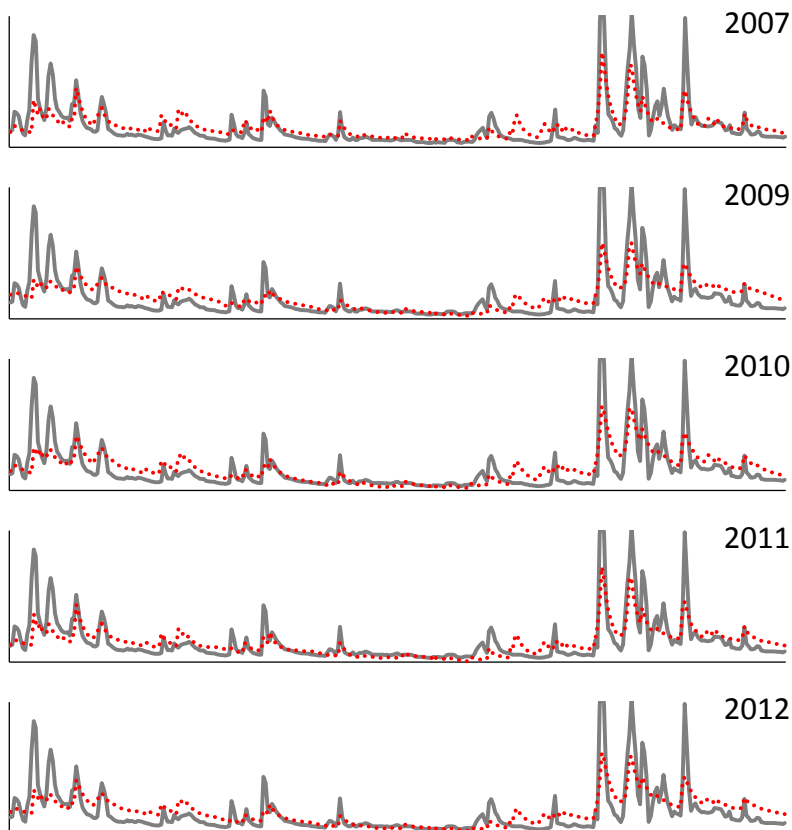




O ano de 2008 é um dos anos úmidos da série, e têm seus valores de pluviosidade mais perto da média anual para todos os anos. É bem validado por praticamente todos os anos da série com um NSE variando de 0,40 a 0,65 com picos bem ajustados principalmente entre os anos úmidos. Para as validações os valores de volume escoado são predominantemente superestimados com um Pbias variando de -13,4 a 3,3 nota-se também, um ajuste razoável do escoamento de base para todos os anos de validação, principalmente nos anos úmidos (2008 a 2012) entre os meses de junho, julho e agosto.

Figura 28 - Aplicação do *Differential Split-Sample Test* para o ano de 2008, com sua calibração e respectivas validações.





A discussão dos parâmetros relacionados à este segundo cenário (*Differential Split-Sample Test*) será feita em relação às médias dos parâmetros encontrados para os anos úmidos e secos, separadamente (Tabela 11). A observação dos valores finais dos parâmetros poderá revelar alguns comportamentos dos processos físicos referentes à bacia durante as estações secas e chuvosas.

O SURLAG (Coeficiente de retardo do escoamento superficial), parâmetro mais sensível para as simulações nesta bacia, e o GW_QMN (nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno) apresentam um valor maior para anos úmidos, o que contraria a priori de que quanto mais água disponível menor será o valor do parâmetro. Este fato pode ser associado ao processo de calibração automático que nem sempre respeita os limites físicos aceitáveis dos parâmetros, sendo estes

valores resultados de uma possível compensação de processos. Gassman et al. (2007) e Cibin et al. (2010) relatam que CN2 é um dos parâmetros mais influentes dentro do SWAT e que é sensível na grande maioria das bacias estudadas. Nesta pesquisa, o CN2 teve em média um aumento de três unidades do ano seco para o ano úmido, os valores mais altos são relativos as sub-bacias onde o uso do solo predominante é o urbano. Segundo Muleta (2012) este fato está de acordo com o conhecimento de que o coeficiente de escoamento (CN2) será mais elevado durante períodos chuvosos, resultante das condições de umidade antecedente do solo. No período úmido o escoamento tende a ser gerado por um excesso de saturação da água no solo, ao contrário do período mais seco onde o excesso de infiltração predominará no processo.

Tabela 11 – Média dos valores de parâmetros para o *Differential Split-Sample Test* com a separação dos períodos secos e úmidos.

Parâmetros	Ano seco	Ano úmido
SURLAG	0,33	1,14
CH_N1	0,13	0,14
CN2	76,58 - 90,51	78,76 - 94,04
SLSOIL (m)	38,84	82,65
GW_REVAP	0,14	0,14
RCHRG_DP (mm)	0,01	0,03
CH_K1 (mm h ⁻¹)	3,31	2,66
CH_K2 (mm h ⁻¹)	3,21	1,69
GW_QMN (mm)	0	512,48
CH_N2	0,06	0,04
GW_DELAY (dias)	73,01	19,01
SOL_AWC (mmH ₂ O mmsolo ⁻¹)	0,10 - 0,14	0,11 - 0,13
CANMAX (mm)	1,09	1,57
ESCO	0,78	0,78
LATTIME (dias)	16,83	64,93

O SOL_AWC (teor de umidade disponível nas camadas do solo) e o ESCO (fator de compensação de evaporação de água no solo) não apresentam mudanças significativas entre os anos secos e úmidos, fato

que pode estar associado as suas sensibilidades serem baixas em relação aos outros parâmetros para esta bacia.

O GW_DELAY (tempo de retardo da água subterrânea) é superior nos anos secos, ou seja, o tempo (dias) de recarga do aquífero raso pelas camadas mais profundas do solo (e.g. aquífero profundo) é maior em anos secos do que em anos úmidos. Os outros dois parâmetros que têm relação com a água subterrânea GW_REVAP e RCHRG_DP, não apresentam mudanças consideráveis para os dois períodos.

Os valores dos parâmetros SLSIOL, LATTIME, CH_N2, CH_N1, CH_K2 e CH_K1 não são influenciados diretamente pela quantidade de chuva que entra na bacia. Onde os valores de CH_N2 e CH_N1 (*Manning*) estão relacionados a canais com margens e fundos irregulares e heterogêneos. Os valores de CH_K2 e CH_K1 (condutividade hidráulica efetiva do canal principal e tributário) indicam que o canal possui baixa perda de água do canal para o solo. O CANMAX que representa a quantidade de água interceptada não apresentou grande variação entre os dois períodos.

Proxy-Catchment Test

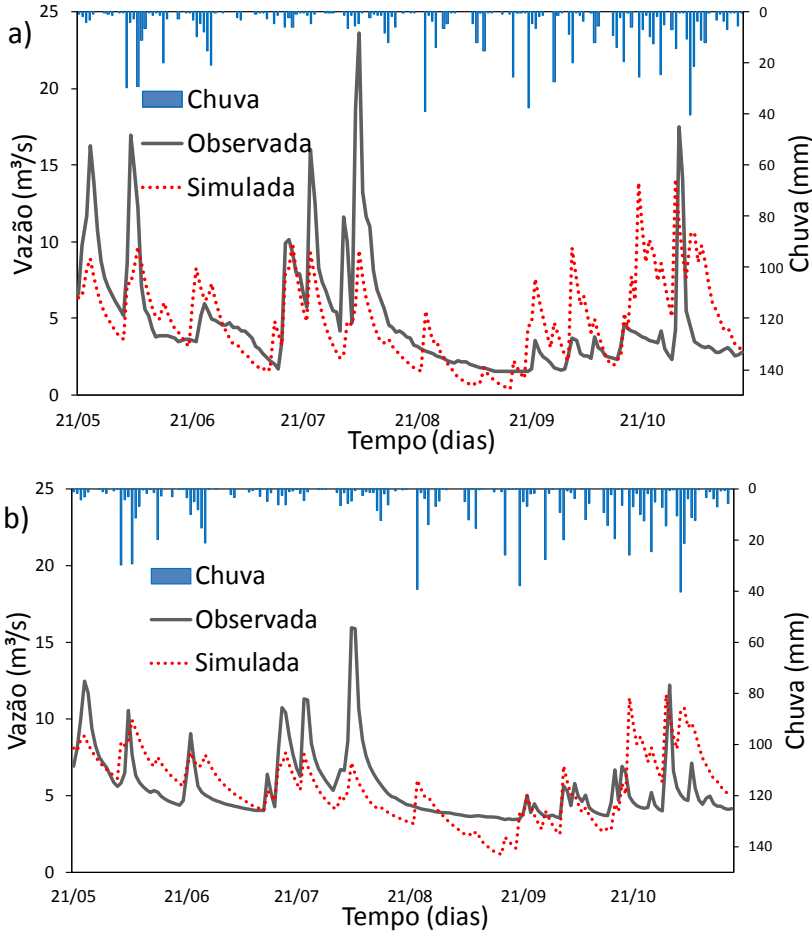
Para o *Proxy-Catchment Test* foram utilizados os dados de monitoramento, medidos no exutório da bacia de estudo. Como são bacias embutidas, o teste mostra se o modelo apresenta maior validade geral, e capacidade de prever mudanças no uso do solo (ver Figura 14).

O teste envolve a calibração do modelo para uma bacia (Rio Negrinho Montante) e, em seguida, execução do teste de validação em outra, que para esse estudo, são os dados do exutório da BHRN. O teste é feito para os valores diários do ano de 2010, que apresenta boa calibração para toda sua série (NSE de 0,52 e Pbias de 1,2%), mostrando bom ajuste dos picos e volumes para o ano.

A série de dados monitorados no exutório da BHRN compreende o período de 21/05/2010 a 17/11/2010, portando na comparação entre calibração e validação, foi utilizado esse intervalo para as duas bacias. Na calibração (Figura 29a), quando analisamos o período separadamente, os valores obtidos são inferiores aos da série total, com um NSE de 0,33 e Pbias de 1,5%. O processo de validação no exutório da BHRN, não foi eficiente para o ajuste das vazões mais altas (NSE de 0,0), porém, eficiente para os volumes (Pbias de 0,1%) (Figura 29b). Isto demonstra que o SWAT foi ineficaz, nesse teste, em prever o ajuste dos picos, porém houve uma compensação dos volumes na estimativa do balanço hídrico. A quantidade de dados disponíveis para o teste, e o

fato de o intervalo utilizado ser a parte mais seca da amostra, pode ser a causa dos baixos valores de NSE.

Figura 29 - Aplicação do *Proxy-Catchment Test*. Processo de calibração (a) na porção da bacia simulada com os dados da estação Rio Negrinho Montante e validação (b) com os dados monitorados do exutório da bacia.

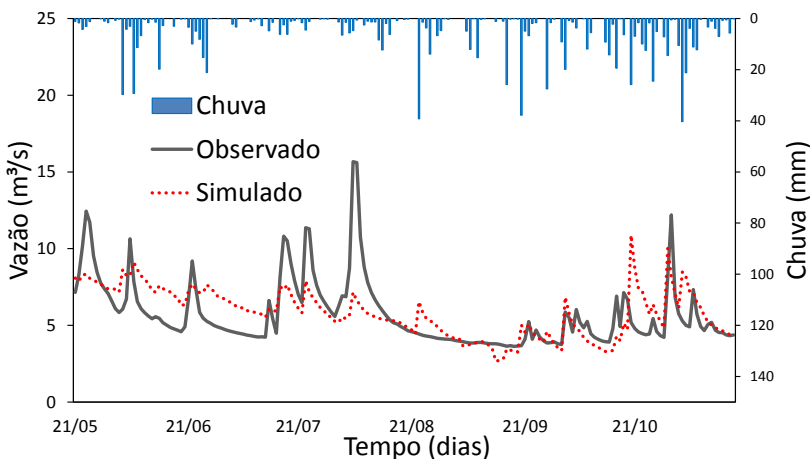


É importante relatar também os erros relativos às curvas-chave confeccionadas. O desvio médio para a curva da estação Rio Negrinho Montante é de 6% e que pode ser considerado aceitável para o método, porém o desvio médio da curva em relação aos valores observados de

vazão para o exutório da bacia é de 15%, com valores pontuais que chegam a 80% de desvio, para a vazão de $5\text{m}^3/\text{s}$, por exemplo. Este fato deve-se a pequena quantidade de medições utilizadas na elaboração da curva, sendo 15 medições para o exutório e 30 medições para a seção Rio Negrinho Montante.

O processo de calibração também foi efetuado para o exutório da BHRN (Figura 30), com os mesmos dados de vazão utilizados no *Proxy-Catchment Test* e parâmetros utilizados nos outros testes diários. O NSE para calibração foi de 0,28 e Pbias de -1,9. Novamente, o baixo desempenho do NSE para a calibração do exutório pode ser atribuído aos erros relacionados à curva-chave e a pequena quantidade de dados disponíveis para o processo.

Figura 30 – Calibração do exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho para o ano de 2010, período de 21/05 a 17/11.



4.6 BALANÇO HÍDRICO

Independente do tipo de estudo realizado com o modelo SWAT, o seu funcionamento será sempre função do balanço hídrico existente na bacia, onde é aplicado o conceito das HRUs. O modelo calcula os fluxos para cada HRU, em seguida, esses resultados são acumulados para gerar o balanço na sub-bacia; por fim, estes são direcionados para a rede de drenagem até atingirem a seção de controle (Neitsch et al., 2009). A produtividade hídrica é obtida pela determinação das componentes do

ciclo hidrológico, que representam as entradas e perdas do sistema (Wang et al., 2005).

A Tabela 12 apresenta para avaliação dos volumes dos escoamentos, a média de todos os anos simulados. Nela são expostos os resultados dos cálculos para simulações diárias e mensais. A vazão total representa 42% do total de chuva que chega à bacia (1724 mm/ano), sendo 67% de escoamento de base e 33% de escoamento superficial. Os valores de vazão de base apresentados como ‘medidos’, são os encontrados pela separação dos escoamentos, realizado no filtro automático *Base Flow Filter* proposto por Arnold et al. (1995).

Para a simulação sem calibração, os valores são superestimados, onde a vazão total é 61% da chuva que chega à bacia e a proporção dos escoamentos é mantida (33% para o escoamento superficial e 67% para o de base). Com as calibrações mensais e diária, a vazão total passa a ser cerca de 41%. Para a calibração mensal de 2003 a 2009 e para os anos separadamente os valores do escoamento superficial e de base são 40% e 60% respectivamente. Quando a calibração diária é feita, a proporção dos escoamentos é 53% para o escoamento superficial e 47% para o de base. Portanto quando analisamos de maneira geral os volumes dos escoamentos simulados pelo SWAT, a calibração mensal apresentou os valores mais próximos dos considerados como reais para este estudo.

Tabela 12 - Médias anuais dos volumes de escoamento, medidos (Med) e simulados (Sim), tanto para os dados brutos (simulados no SWAT sem calibração), como para os dados calibrados no passo diário e mensal.

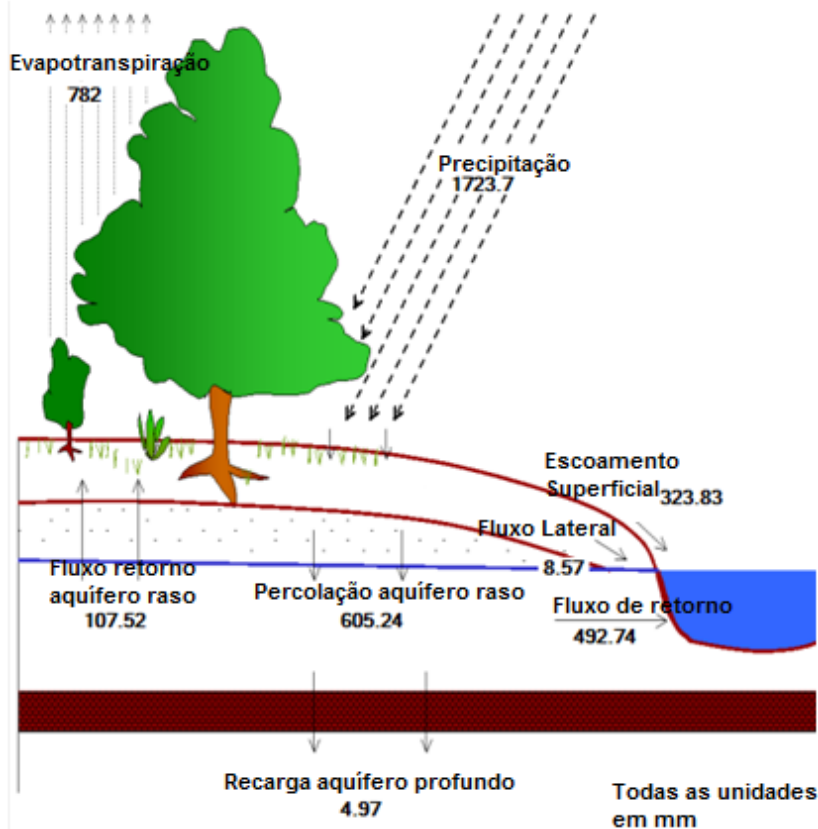
	Chuva (mm)	Escoamento total (mm)		Escoamento superficial (mm)		Escoamento de base (mm)	
		Med	Sim	Med	Sim	Med*	Sim
Bruto	1724	715	1059	239	347	476	712
CM	1724	715	823	239	331	476	493
CMS	1724	715	827	239	330	476	497
CDS	1724	715	822	239	439	476	384

CM: Calibração mensal 2003-2009; CMS: Calibração mensal para os anos separados; CDS: Calibração diária para os anos separados; EB: Escoamento de base; ES: Escoamento superficial; Medido: valores encontrados a partir da separação dos escoamentos realizado pelo filtro automático proposto por Arnold, et al. (1995).

Como demonstração dos outros processos envolvidos, a Figura 31 (criada no programa SWAT Check, White et al., 2014) apresenta o

balanço hídrico mensal de 2003 a 2009 para bacia hidrográfica do Rio Negrinho com precipitação média anual de cerca de 1724 mm. A evapotranspiração real é equivalente a 45% do total de chuva que chega a bacia, concordando com os resultados obtidos por Bonumá et al., 2013 para um estudo realizado na bacia do Rio Preto, norte catarinense, que apresenta características de uso e tipo de solo semelhantes à bacia deste estudo. A percolação é 35%, porém apenas 0,2% chegam como recarga ao aquífero profundo.

Figura 31 - Demonstração dos valores envolvidos no balanço hídrico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho para calibração mensal no período de 2003 a 2009.



5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A bacia hidrográfica do Rio Negrinho mostrou-se apropriada para execução dos métodos descritos neste estudo, os múltiplos usos do solo e a existência de dados monitorados ajudam a dar confiabilidade à metodologia. Quanto a adequação da metodologia proposta ao modelo SWAT, não foram encontradas restrições, garantindo a avaliação do modelo nas escalas espacial e temporal.

O SWAT mostrou-se representativo quando o objetivo é a simulação de cenários de clima úmido, mesmo quando a série de dados de calibração é considerada seca, o modelo consegue prever satisfatoriamente a transição entre os períodos. Porém a mesma eficiência nos resultados não ocorre quando o intuito é a simulação de cenários mais secos, sendo que algumas vezes o modelo é bem sucedido (e.g. 2007) outras não (e.g. 2003 e 2006). Portanto deve-se ter cuidado quanto à escolha da série histórica, ela deve ser espacialmente bem distribuída e representar corretamente os objetivos do usuário.

No teste para a verificação da eficiência do modelo em prever mudanças no uso do solo, o modelo só apresentou boa representação para o Pbias (0,1%), já para o NSE, que avalia o bom ajuste dos picos, o modelo não se mostrou representativo (NSE de 0,0). Este fato pode estar associado que, nesta etapa do estudo a quantidade de dados disponíveis é relativamente pequena (menos de um ano), quando comparada às outras fases do estudo, e o intervalo avaliado (21/05/2010 a 17/11/2010) representa a parte mais seca da amostra, o que pode levar o modelo a não efetuar de maneira eficiente uma simulação que considere a variabilidade espacial da bacia. Aconselha-se então, que na realização deste teste, uma série de dados mais representativa seja utilizada.

De forma geral, os resultados indicam que a eficiência do modelo SWAT depende da escala espacial e do período de calibração. Para simulação de cenários climáticos e de mudanças de uso do solo o modelo deve ser calibrado e validado usando dados espacialmente bem distribuídos e uma série de vazões suficientemente representativa em relação aos períodos secos e úmidos

Recomenda-se que a análise de sensibilidade seja repensada, além da execução de uma nova análise para cada bacia, pois a significância dos parâmetros tende a modificar para diferentes condições de clima na bacia (e.g. anos secos e úmidos). Com a identificação destas diferenças entre os parâmetros, o processo de calibração tende a ser mais eficiente. A calibração do modelo SWAT, também deve ser testada com a utilização de outras funções objetivo, por exemplo, que valorizem as

vazões mínimas. Na análise dos resultados, tanto nos considerados eficientes ou não, as hipóteses de erros nos dados de entrada (e.g. vazão e chuva) e na própria concepção do modelo, devem ser considerados. Finalmente recomenda-se que em trabalhos futuros seja feita análises de incerteza dos dados monitorados e do modelo, de forma a proporcionar um nível ainda maior de confiança nas simulações.

6. REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S. SWATCUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In: Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation. p.1603-1609, 2007.
- ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* v.333, p.413-430, 2004.
- ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R.. Spatially distributed modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology.* v.333, p.413-430, 2007.
- ANDRÉASSIAN, V. Three Riddles in Hydrological Modelling. Habilitation Thesis, Université Pierre et Marie Curie. 154p. 2005.
- ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; BERTHET, L.; LE MOINE, N.; LERAT, J.; LOUMAGNE, C.; OUDIN, L.; MATHEVET, T.; RAMOS, M.H.; VALÉRY, A. Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* v.13, p.1757-1764, 2009.
- ALLEN, R.G.; JENSEN, J.L.; BURMAN, R.D. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal.* v.81, p.650-662.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R.; BERNHARDT, G. Automated baseflow separation and recession analysis techniques. *Ground Water.* v.33, n.6, p.1010-1018, 1995.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Water Resour. Assoc.* v.34, n.1, p.73-89, 1998.
- ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K.. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE.* v.55, n.4, p.1494-1508, 2012.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. v.34, p.253-261, 2010.

BEVEN, K. J. *Rainfall-runoff modelling: The primer*. Chichester: John Wiley & Sons Ltda. 1ªed. 360p. 2001.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models – model calibration & uncertainty prediction, *Hydrological Process*. v.6, n.3, p.279–298, 1992.

BILONDI, P. M.; ABBASPOUR, K. C.; GHAHRAMAN, B. Application of three different calibration-uncertainty analysis methods in a semi-distributed rainfall-runoff model application. *Middle-East Journal of Scientific Research*. v.15, n.9, p.1255-1263, 2013.

BONUMÁ, N. B.; CORSEUIL, C. W.; KOBIYAMA, M.; ZANIN, P. R.; CORRÊA, F. Estimativa do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com o modelo SWAT. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 2013.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; PAIVA, E.M.C.D. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. *Applied Engineering in Agriculture*. v.29, p.189-200, 2013.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. H. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P.; ALLEN, P. M.; VOLK, M. . Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. *Journal of Environmental Quality*. v.43, p.55-66, 2014.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L.; SRINIVASAN, R.; MENDIONDO, E. M. ; BONUMA, N. B. . A review of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IJABE)*, In Press, 2015.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v.14, n.3, p.37-50, 2009.

CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V.S.; RUFINO, I. A. A. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do Riacho dos Namorados no Cariri Paraibano. *Revista Geografia Acadêmica*. v.5, n.2, p.30-40, 2011.

CIBIN, R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Processes*. v.24, n.9, p.1113-1148, 2010.

CLIFFORD, N. J. Hydrology: the changing paradigm. *Progress in Physical Geography*. v.26, n.2, p. 290–301, 2002.

COMMITTEE ON CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN THE HYDROLOGIC SCIENCES. Challenges and opportunities in the Hydrologic Sciences. 200p, 2012.

COSTA, F.M.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir de fluxo de base. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 15, pp.173-183, 2009.

DILE, Y. T.; R. SRINIVASAN. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. p.1-16, 2014.

EAWAG. SWAT-CUP. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Disponível em:
ww.eawag.ch/organisation/abteilungen/siam/software/swat/index_EN.

EPAGRI/CIRAM. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina - Zoneamento Agroecológico. Disponível em: < http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=88&Itemid=273 >. Acesso em: 18 de fevereiro de 2014.

EBERHART, R. C.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science. IEEE service center. p. 9-43, 1995.

FARMAZI, M.; ABBASPOUR, R.; YANG, H. Modeling blue and green water availability in Iran. Hydrological Process. v.23, n.3, p.486-501, 2009.

FRAGOSO Jr., C.R., FERREIRA, T.F., MARQUES, D.M. Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos. São Paulo: Oficina Textos. 304p. 2009.

GALVÁN, L. A.; OLÍAS, M. A.; IZQUIERDO, T. B.; CERÓN, J. C. A.; VILLARÁN, R. C. F. Rainfall estimation in SWAT: An alternative method to simulate orographic precipitation. Journal of Hydrology. v.509, p.257-265, 2014.

GAN. T. Y.; DLAMINI. E. M.; BIFTU. G. F. Effects of model complexity and structure data quality and objective functions on hydrologic modeling. Journal of Hydrology. v.192, n.1, p.81-103, 1997.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C.; LAPA, K. R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. International SWAT Conference & Workshops. 2011.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. American Society of Agricultural and Biological Engineers. v.50, n.4, p.1211-1250, 2007.

GASSMAN, P. W. The Worldwide use of the SWAT model: Technological drivers, networking impactos, simulation trends, and potential future constrains. International SWAT Conference, Toledo, Espanha, 2011.

GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. Journal of Hydrology. v.228. p.113-129, 2000.

GREEN, C. H.; TOMER, M. D.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. *Transactions of the ASABE*. v. 4., n. 2, p.413-422, 2006.

GRIZZETTI, B.; BOURAOUI, F.; MARSILY, G. Modelling nitrogen pressure in river basins: A comparison between a statistical approach and the physically based SWAT model. *Physics Chem. Earth*. v.30, n.8-10, p.508-517, 2005.

GUPTA, H.V.S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic engineering*, v.4, n.2, p.135-143, 1999.

JACCON, G.; CUDO, K.J. *Curva-chave: análise e traçado*, Brasília, DNAEE. 273p, 1989.

KENNEDY, J. E EBERHART, R.C. *Swarm Intelligence*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. p.1942-1948, 1995.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* v. 31, n.1, p13-24, 1986.

KOBIYAMA, M., GRISON, K. MOTA, A. M. *Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais*. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS/Labhidro, 3ªed. 242p, 2011.

KUCZERA, G.; PARENT, E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*. v.211, n.1, p.69-85, 1998.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. *Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região Sudeste do Brasil*. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. v.36, p.623-634, 2012.

LENHART, K.; ECKHARDT, N.; FOHRER, FREDE H.G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*. v.27, p.645-654, 2002.

LI. C. Z.; ZHANG. L.; WANG. H.; ZHANG. Y. Q.; YAN. D. H. The transferability of hydrological model under nonstationary climatic conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* v.16, p.1239-1254, 2012.

LOAGUE, K.; HEPPNER, C. S.; MIRUS, B. B.; EBEL, B. A.; RAN, Q.; CARRI, A. E.; BEVILLE, S. H.; VANDERKWAAK, J. E. Physics-based hydrologic-response simulation: foundation for hydroecology and hydrogeomorphology. *Hydrological Process.* v.20, p.1231-1237, 2006.

LUBITZ, E.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Simulação do transporte de sedimentos, nitrogênio e fósforo na bacia do Ribeirão Concórdia, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* v.18, n.2, p.39-54, 2013.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C.A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* v.8, n.1, p.147-155, 2013.

MALUTTA, S. Estudo Hidrossedimentológico da Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho - SC Com o Modelo SWAT. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (UFSC). Florianópolis, 126p. 2012.

MAMO, K. H. M.; JAIN, M. K. Runoff and sediment modeling using swat in Gumera catchment, Ethiopia. *Open Journal of Modern Hydrology.* v.3, p.196-205, 2013.

MELO NETO, J. O.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Simulação hidrológica escalar com o Modelo SWAT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* v.19, n.1, p.177-188, 2014.

MERRITT, W.S., LETCHER, R.A., JAKEMAN, A.J. A Review of Erosion and Sediment Transport Models. *Science Direct. Environmental Modelling Software*, p761-799. 2003.

McCUEN, R.H.; SNYDER, W.M. Sensitivity analysis and Probabilistic Modeling. In: McCUEN, R.H.; SNYDER, W.M. *Hydrologic modeling: statistical methods and applications*. New York: Prentice Hall. 1986.

MORIASI, D. N.; ARNOLD J. G.; VAN LIEW. M. W.; BINGNER. R. L.; HARMEL R. D.; VEITH. T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*. v.50. n.3. p.885-900, 2007.

MORIASI. D. N.; WILSON. B. N.; DOUGLAS-MANKIN. K. R.; ARNOLD. J. G.; GOWDA. P. H. Hydrologic and water quality models: use. calibration. and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. v. 55, n.4, p.1241-1247, 2012.

MULETA, M. K. Improving model performance using season-based evaluation. *Journal of Hydrologic Engineering*. v.191, p.191-200, 2012.

NASH. J. E.; J. E. SUTCLIFFE. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. v.10, n.3, p.282-290, 1970.

NATHAN, R.J.; MCMAHON, A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*. v.26, n.7, p.1465-1473, 1990.

NEITSCH. S.L.; ARNOLD. J.G.; KINIRY. J.R.; WILLIAMS. J.R. Soil and water assessment tool. *Theoretical Documentation*. Agricultural Research Service. 2009.

QIAO, L.; HERRMANN, R. B.; PAN, Z. Parameter uncertainty reduction for swat using grace, streamflow, and groundwater table data for lower Missouri river basin. *Journal of the American Water Resources Association*. v.49, n.2, p.343-358, 2013.

RAHBEH, M.; CHANASYK, D.; MILLER, J. Two-way calibration-validation of SWAT Model for a small prairie watershed with short observed record. *Canadian Water Resources Journal*. v. 36, n.3, p.247-270, 2013.

RIDWANSYAH, I.; PAWITAN, H.; SINUKABAN, N.; HIDAYAT, Y. Watershed modeling with ArcSWAT and SUFI2 in Cisadane catchment area: calibration and validation to prediction of river flow. *International Journal of Science and Engineering*. v.6, n.2, p.12-21, 2014

RODERJAN, C.V.; GALVAO, F.; KUNIYOSHI, Y.S.; HATSCHBACH, G.G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná. *Ciência & Ambiente. UFSM.* v.24, p.75-92, 2002.

ROUHOLAHNEJAD. E.; ABBASPOUR. K. C.; VEJDANI. M.; SRINIVASAN. R.; SCHULIN. R.; LEHMANN. A. A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling Software.* v.31, p.28-36, 2012.

ROSSI. C. G.; DYBALA. T.J.; MORIASI. D. N.; ARNOLD. J .G.; AMONETT. C.; MAREK. T. Hydrologic calibration and validation of the Soil and Water Assessment Tool for the Leon River watershed. *Journal of Soil and Water Conservation.* v.63, n.6, p.533-541, 2008.

SANTHI. C; ARNOLD. J. G.; WILLIAMS. J. R.; DUGAS. W. A.; SRINIVASAN. R.; HAUCK. L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association.* v.37, n.5, p.1169-1188, 2001.

SAVENIJE, H.H.G. *The Art of Hydrology. Hydrology and Earth System Sciences.* v.13, p.157–161, 2009.

SILVEIRA, A. L. L. In: TUCCI, C.E.M. *Hidrologia, Ciência e Aplicação.* Porto Alegre: 4ª ed. UFRGS/ABRH. 943p. 2013.

TUCCI, C.E.M. *Modelos Hidrológicos.* Porto Alegre: 2ª ed. UFRGS - Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 678p, 2005.

TUCCI, C.E.M. *Hidrologia, Ciência e Aplicação.* Porto Alegre: 4ª ed. UFRGS/ABRH. 943p. 2013.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I. Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT. *Espaço Geográfico em Análise.* v. 28, p. 134-153, 2013.

UZEIKA, T., G. MERTEN, J.P.G. MINELLA, AND M. MORO. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. *Brazilian J. Soil Sci.* v.36, p.1-9. 2012.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v.324, p.10–23, 2006.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality Models, *Water Science. & Technology*. v.53, n.1, p.51–59, 2006.

XU, C. Y. Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.98,n.99, p.295-304, 1999.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K.C.; XIA, J.; YANG, H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*. v.358, p.1– 23, 2008.

YAPO, P. O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*, v. 181, p. 23-48. 1996.

WANG, J.; SAMMIS, T. W.; MEIER, C. A.; SIMMONS, L. J.; MILLER, D. R.; BATHKE, D. J. Remote Sensing Vegetation Recovery after Forest Fires using Energy Balance Algorithm. In: *Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology Sponsored by American Meteorological Society, Canadá*, 11p. 2005.

WHITE, M.J., R.D. HARMEL, J.G. ARNOLD, AND J.R. WILLIAMS. SWAT check: A screening tool to assist users in the identification of potential model application problems. *J. Environ. Qual.* v.43, p.208-214, 2014.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R. Gis-Based Spatial Precipitation Estimation: A Comparison Of Geostatistical Approaches, *Journal Of The American Water Resources Association*, v,45, n,4, 2009.

ZHANG, D.; CHEN, X.; YAO, H.; LIN, B. Improved calibration scheme of SWAT by separating wet and dryseasons. *Ecological Modelling*. v.301, p.54-61, 2015.

ZHU, Q.; ZHANG, X.; CHONG, G.; XU, Y. P. Investigating the uncertain and transferability of parameters in SWAT Model under climate change. *Hydrological Science Journal*. In Press. 2015.

ANEXO A

Tabela 1 – Dados de cota, vazão e velocidade coletados no exutório da bacia hidrográfica do Rio Negrinho (Malutta, 2012).

Data	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Velocidade (m/s)
24/07/2008	0,96	2,52	0,21
01/05/2009	0,78	0,87	0,07
02/05/2009	0,80	1,12	0,09
10/05/2009	0,80	1,17	0,10
16/07/2009	1,02	3,63	0,25
23/08/2009	1,80	5,00	0,31
13/09/2009	2,15	13,88	0,43
30/09/2009	4,98	49,10	0,60
30/09/2009	4,75	30,75	0,53
12/09/2009	2,68	18,51	0,47
12/09/2009	2,46	15,24	0,47
01/10/2009	4,32	26,55	0,49
01/10/2009	4,22	25,93	0,49
03/10/2009	3,71	23,81	0,49
03/10/2009	3,84	21,31	0,45