

THIAGO ALVES ANTUNES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ALTO CANOAS ATRAVÉS DO MODELO SWAT**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Florestal, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Sílvio Luís Rafaeli Neto

**LAGES, SC
2015**

A636m Antunes, Thiago Alves
Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do
Alto Canoas através do modelo SWAT / Thiago Alves
Antunes. - Lages, 2015.
130 p.: il. ; 21 cm

Orientador: Sílvio Luís Rafaeli Neto
Bibliografia: p. 123-130
Dissertação (mestrado) - Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Florestal, Lages, 2015.

1. Recursos hídricos. 2. Escala diária. 3.
Escala mensal. 4. Curva de permanência. 5. Filtro
numérico. 6. Cenário. 7. Uso do solo. I. Antunes,
Thiago Alves. II. Rafaeli Neto, Sílvio Luís. III.
Universidade do Estado de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. IV. Título

CDD: 627.12 - 20.ed.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Setorial do
CAV/ UDESC

THIAGO ALVES ANTUNES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ALTO CANOAS ATRAVÉS DO MODELO SWAT**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Florestal, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Florestal.

Banca examinadora

Orientador: _____
(Dr. Sílvio Luís Rafaeli Neto)
CAV-UDESC

Membro: _____
(Dr. Idelgardis Bertol)
CAV-UDESC

Membro: _____
(Dr. Masato Kobiyama)
IPH-UFRGS

Lages, 20/02/2015

RESUMO

ANTUNES, Thiago Alves. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas através do modelo SWAT**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2015.

A bacia hidrográfica do Rio Canoas demanda estudos que visem à gestão de seus recursos hídricos. A modelagem hidrológica se mostra promissora como auxiliar no processo de construção de seu plano de bacia, uma vez que produz representações formais da realidade. O SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) é um modelo hidrológico capaz de simular vazões a partir de um conjunto complexo de dados de entrada e de um conjunto significativo de parâmetros calibrados. No presente estudo, o modelo SWAT foi calibrado e validado em uma sub-bacia de 1973 Km² da bacia do Rio Canoas, denominada bacia do Alto Canoas. Os parâmetros foram calibrados por processo semi-automático tanto para escala diária como mensal. A qualidade da calibração e da validação foi avaliada com base nos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) e R². O modelo foi aplicado na estimativa da curva de permanência, na estimativa das vazões básicas separadas por filtro numérico e em cenários de possíveis impactos hidrológicos provocados por mudanças no uso do solo. Foram utilizados dois anos para calibração do modelo (1996-1997), sendo o ano de 1995 utilizado como período de aquecimento do modelo, e quatro anos para validação (1998-2001). O modelo foi validado na escala diária com NSE de 0,76 e R² de 0,79. Na escala mensal, o modelo foi validado com um NSE de 0,87 e R² de 0,89. O balanço hídrico calculado pelo modelo indicou que na bacia estudada ocorre contribuição significativa do escoamento sub-superficial e básico na formação das vazões nos canais. Os parâmetros do modelo diferiram tanto na escala diária como na escala mensal, indicando haver relevâncias distintas de determinados processos hidrológicos conforme a variação da escala temporal. O modelo mostrou-se satisfatório tanto na simulação de eventos diários como mensais. Concluiu-se que o modelo calibrado pode ser utilizado tanto na análise de eventos diários como mensais, a partir de dados

climatológicos. O acoplamento de modelo hidrológico com climatológico mostra-se um caminho promissor como ferramenta a ser aplicada na gestão dos recursos hídricos da bacia do Alto Canoas.

Palavras Chave: Recursos hídricos; escala diária; escala mensal; curva de permanência; filtro numérico; cenário; uso do solo.

ABSTRACT

ANTUNES, Thiago Alves. **Hydrological modeling of Alto Canoas basin through of SWAT**. 2015. 130 f. Dissertation (master's degree Forest Engineering) – State University of Santa Catarina. Postgraduate Program in Forest Engineering, Lages, 2015.

The Rio Canoas basin demands studies that seek the management of their hydrological resources. The hydrological modeling is promising as helper of construction process of its basin plan, because produce formal representation of reality. SWAT (Soil Water Assessment Tool) is a hydrological model able to predict runoffs by a complex group of inputs and by a significant group of calibrated parameters. In this study, SWAT was calibrated and validated in a watershed of 1973 Km² of Rio Canoas, called Alto Canoas basin. Parameters were calibrated by semiautomatic process as to daily scale as to monthly scale. The quality of the calibration and validation was evaluated by their Nash-Sutcliffe (NSE) and R² coefficients. The model was applied in the estimative of permanence curves, in the estimative of basic runoffs separated by numeric filter and in scenarios of possible hydrological impacts caused due to land use changes. It took two years to model calibration (1996-1997), where the year 1995 was used as warm up period of the model, and four years to validation (1998-2001). The model was validated in daily scale with a NSE of 0,76 and R² of 0,79. In monthly scale, the model was validate with a NSE of 0,87 and R² of 0,89. The hydrological balance by the model indicates that in the studied basin has a significant contribution of the lateral and return flow in the formation of total runoff in the reaches. The model parameters differ as in daily scale as in monthly scale, it indicate that have different relevance of some hydrological processes according to variation of time scale. The model shows as satisfactory in the simulation of daily and monthly events. This study concludes that the calibrated model can be used as to analyze daily and monthly events, by climatological data. The attachment of hydrological model with the climatological shows as a promising way as tool to be applied in hydrological resources management of Alto Canoas basin.

Keywords: Hydrological resources, daily scale, monthly scale, permanence curve, numeric filter, scenario, land use.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Fluxo da água na fase terrestre do ciclo hidrológico.....	26
Figura 2 -	Fases do ciclo hidrológico simuladas pelo SWAT..	34
Figura 3 -	Situação da bacia hidrográfica do Alto Canoas em relação a bacia hidrográfica do Canoas.....	47
Figura 4 -	Localização da área de estudo e seu mapa de declividades.....	48
Figura 5 -	Modelo digital de elevação da área de estudo.....	50
Figura 6 -	Perímetro da bacia hidrográfica do Alto Canoas definida a partir da estação fluviométrica Rio Bonito sobre o recorte do modelo digital de elevação da área de estudo.....	51
Figura 7 -	Divisão da bacia hidrográfica do Alto Canoas em sub-bacias e seus exutórios, bem como os canais gerados pelo modelo SWAT.....	52
Figura 8 -	Mapa de uso da terra da bacia do Alto Canoas.....	53
Figura 9 -	Mapa de solos da bacia do Alto Canoas.....	55
Figura 10 -	Mapa de declividade da bacia hidrográfica do Alto Canoas gerado pelo modelo SWAT.....	57
Figura 11 -	Método dos polígonos de <i>Thiessen</i> aplicado, estações pluviométricas e estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET de Lages.....	60
Figura 12 -	Representação pictórica do balanço hídrico médio anual da bacia hidrográfica do Alto Canoas referente ao período de 1995 a 2001.....	71
Figura 13 -	Hidrogramas diários observado e simulado com calibração automática, nos anos de 1996 e 1997.....	80
Figura 14 -	Hidrogramas diários observado e simulado com calibração semi-automática, nos anos de 1996 e 1997.....	81
Figura 15 -	Hidrogramas observado e simulado dos anos de 1998 a 2001 para escala diária no período de validação.....	82
Figura 16 -	Diagrama de dispersão das vazões observada e simulada na escala diária no período de 1998 a 2001, na bacia do Alto Canoas.....	83
Figura 17 -	Distribuição da demanda evaporativa do solo relacionada à profundidade.....	88

Figura 18 -	Hidrogramas mensais observado e simulado com calibração automática, nos anos de 1996 e 1997.....	92
Figura 19 -	Hidrogramas mensais observado e simulado com calibração semi-automática, nos anos de 1996 e 1997.....	93
Figura 20 -	Hidrogramas observado e simulado dos anos de 1998 a 2001 para escala mensal no período de validação.....	94
Figura 21 -	Diagrama de dispersão das vazões observada e simulada na escala mensal no período de 1998 a 2001, na bacia do Alto Canoas.....	95
Figura 22 -	Sensibilidade dos parâmetros físicos do modelo calibrados semi-automaticamente na escala diária..	96
Figura 23 -	Sensibilidade dos parâmetros físicos do modelo calibrados semi-automaticamente na escala mensal.....	99
Figura 24 -	Curva de permanência observada e estimada no período de validação (1998 a 2001) na escala diária.....	101
Figura 25 -	Curva de permanência observada e estimada no período de validação (1998 a 2001) na escala mensal.....	102
Figura 26 -	Curva de permanência das vazões simuladas através dos diferentes cenários durante o período de validação (1998 a 2001) na escala diária.....	104
Figura 27 -	Curva de permanência das vazões simuladas através dos diferentes cenários durante o período de validação (1998 a 2001) na escala mensal.....	106
Figura 28 -	Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de calibração na escala diária (1996 a 1997).....	109
Figura 29 -	Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de validação na escala diária (1998 a 2001).....	111
Figura 30 -	Diagrama de dispersão da vazão básica diária calculada a partir da vazão total observada e estimada pelo modelo SWAT no período de validação (1998-2001) para a bacia do Alto Canoas.....	112

Figura 31 -	Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de calibração na escala mensal (1996 a 1997).....	114
Figura 32 -	Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de validação na escala mensal (1998 a 2001).....	116
Figura 33 -	Diagrama de dispersão da vazão básica mensal calculada a partir da vazão total observada e estimada pelo modelo SWAT no período de validação (1998-2001) para a bacia do Alto Canoas.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Redefinição das classes de uso da terra conforme as pré-definidas no modelo SWAT.....	54
Tabela 2 -	Parâmetros referentes a classe de solo Cambissolo Húmico inseridos no modelo SWAT.....	55
Tabela 3 -	Estações pluviométricas elencadas inicialmente para composição do banco de dados de entrada do SWAT.....	59
Tabela 4 -	Parâmetros do gerador de dados climáticos (<i>Weather Generator Data</i>).....	62
Tabela 5 -	Parâmetros do gerador de dados climáticos calculados com base nos dados das cinco estações pluviométricas com área de influência na bacia hidrográfica do Alto Canoas e na estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET de Lages.....	63
Tabela 6 -	Significado físico dos parâmetros utilizados.....	67
Tabela 7 -	Valores de CN para diferentes coberturas de solo em quatro grupos hidrológicos.....	72
Tabela 8 -	Parâmetros de calibração do modelo SWAT na modelagem hidrológica da bacia do Alto Canoas na escala diária.....	75
Tabela 9 -	Parâmetros de calibração do modelo SWAT na modelagem hidrológica da bacia do Alto Canoas na escala mensal.....	85
Tabela 10 -	Comparação dos parâmetros calibrados na escala diária e escala mensal.....	86
Tabela 11 -	Volumes totais de precipitação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial e escoamento básico para os anos de 1996 e 1997.....	110
Tabela 12 -	Volumes totais de precipitação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial e escoamento básico para os anos de 1998 a 2001.....	113

LISTA DE SÍMBOLOS

SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
HRU	<i>Hydrological Response Units</i> - Unidades de Resposta Hidrológica
SW_t	Quantidade final de água no solo (mm)
SW_0	Quantidade inicial de água no solo (mm)
t	Tempo (mm)
R_i	Precipitação (mm)
Q_i	Escoamento superficial (mm)
ET_i	Evapotranspiração (mm)
P_i	Percolação (mm)
QR_i	Escoamento lateral (mm)
Q_s	Escoamento acumulado ou excesso de chuva (mm)
R	Precipitação diária (mm)
I_a	Abstração inicial (armazenamento superficial, interceptação, infiltração - mm)
S	Parâmetro de retenção
CN	Curva número, função da permeabilidade, uso e histórico de umidade do solo
S_{prev}	Parâmetro de retenção para o dia anterior (mm)
E_0	Evapotranspiração potencial para o dia (mm d^{-1})
$cncoeff$	Coefficiente usado para o cálculo de CN diário
S_{max}	Valor máximo que o parâmetro de retenção pode alcançar em um dado dia (mm)
R_{day}	Precipitação para o dia (mm)
Q_{surf}	Escoamento superficial (mm)
λ	Densidade do fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
E	Taxa de evaporação profunda (mm d^{-1})
A	Rampa da curva pressão-temperatura do vapor de saturação, de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
H_{net}	Radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
G	Densidade de fluxo de calor à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
ρ_{air}	Densidade do ar (kg m^{-3})
c_p	Calor específico à pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)
e_z	Pressão de vapor de saturação do ar à altura z (kPa)
e_z	Pressão de vapor de água do ar à altura z (kPa)
γ	Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

r_c	Resistência do dossel vegetativo ($s\ m^{-1}$)
r_a	Resistência de difusão da camada de ar ($s\ m^{-1}$)
AWC	Capacidade de água disponível
FC	Quantidade de água à capacidade de campo
WP	Quantidade de água no ponto de murcha permanente
WP_{ly}	Quantidade de água no ponto de murcha (fração do volume total do solo)
m_c	Percentual de argila da camada (%)
ρ_b	Massa específica aparente do solo na camada ($Mg\ m^{-3}$)
$w_{perc,ly}$	Quantidade de água que percola para uma camada inferior em um determinado dia (mm)
$SW_{ly,excess}$	Volume drenável de água no solo em um determinado dia (mm)
Δt	Extensão do passo de tempo (h)
TT_{perc}	Duração da percolação (h)
Q_{lat}	Descarga de água da rampa de saída ($mm\ dia^{-1}$)
K_{sat}	Condutividade hidráulica saturada ($mm\ h^{-1}$)
slp	Declividade da rampa ($m\ m^{-1}$)
ϕ_d	Porosidade drenável da camada de solo ($mm\ mm^{-1}$)
L_{hill}	Comprimento de rampa (m)
TT_{lag}	Tempo de escoamento lateral (dias)
$K_{sat,mx}$	Condutividade hidráulica saturada para a camada mais alta do perfil ($mm\ h^{-1}$)
$aq_{sh,i}$	Quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm)
$aq_{sh,i-1}$	Quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i-1 (mm)
$w_{rchrg,sh}$	Quantidade de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm)
Q_{gw}	Escoamento básico ao canal no dia i (mm)
w_{revap}	Quantidade de água indo para a zona não saturada do solo em resposta às deficiências de água no dia i (mm)
$w_{pump,sh}$	Quantidade de água retirada do aquífero raso por bombeamento no dia i (mm)
$Q_{gw,i}$	Escoamento básico quando este alcança o canal
α_{gw}	Constante de recessão do escoamento de base (se trata do mesmo parâmetro físico ALPHA_BF)

Δt	Intervalo de tempo
$W_{rchrg,sh}$	Quantidade de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm)
BFD	Número de dias de escoamento de base para a bacia
$W_{revap,mx}$	Quantidade de água movendo para a zona não saturada em resposta a deficiências de água (mm)
β_{rev}	Coefficiente revap (GW_REVAP no SWAT)
Δbio	Biomassa potencial
RUE	Eficiência da planta no uso da radiação (0,1 g MJ ⁻¹)
H_{dia}	Incidência solar total (MJ m ⁻²)
$0,5.H_{dia}$	Radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ m ⁻²)
k_l	Coefficiente de extinção da luz
LAI	Índice de área foliar
RH 4	Região Hidrográfica 4, denominada Planalto de Lages, com uma área de 22.808 km ² , engloba as bacias hidrográficas Canoas e Pelotas
MDE	Modelo digital de elevação
FRSE	<i>Forest-Evergreen</i> - Mata nativa
AGRC	<i>Agricultural</i> - Agricultura
PINE	<i>Pine</i> - Reflorestamento
PAST	<i>Pasture</i> - Campos
URBN	<i>Residential</i> - Área urbana
SNAM	Nome do solo
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima de enraizamento (mm)
ANION_EXCL	Fração de porosidade
SOL_CRK	Volume de rachadura
TEXTURE	Textura do solo.
SOL_Z	Profundidade do solo (mm)
SOL_BD	Densidade aparente (úmida) (g cm ⁻³)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada de solo (mmH ₂ O mm ⁻¹ solo)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm h ⁻¹)
SOL_CBN	Carbono orgânico (% peso solo)
SOL_CLAY	A percentagem de partículas do solo que são < 0,002 mm de diâmetro
SOL_SILT	Silte (% peso solo)
SOL_SAND	A percentagem de partículas que têm diâmetro

	entre 2,0 e 0,05 mm
SOL_ROCK	A percentagem da amostra que tem um diâmetro de partícula > 2 milímetros
SOL_ALB	Albedo
USLE_K	Fator de erodibilidade
SOL_EC	Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)
TMPMX	Temperatura máxima média mensal (°C)
TMPMN	Temperatura mínima média mensal (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima no mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima no mês (°C)
PCPMM	Total médio de chuva no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão para o total médio de chuva (mm)
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação
PR_W1	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia seco no mês
PR_W2	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso no mês
PCPD	Média mensal de dias com chuva
RAINHHMX	Chuva máxima mensal em 0,5 h (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ m ⁻²)
DEWPT	Umidade relativa média no mês (decimal)
WNDAV	Velocidade média diária do vento no mês (m s ⁻¹)
GW_REVAP.gw	Parâmetro controlador da quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes (adimensional).
ESCO.hru	Coefficiente de compensação de evaporação no solo (adimensional).
CH_N2.rte	Coefficiente de rugosidade do canal principal (m ^{-1/3} s).
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica na base do canal principal (mm h ⁻¹).
ALPHA_BNK.rte	Fator de fluxo de armazenamento (dias).
SOL_AWC.sol	Capacidade de água disponível da camada de solo (mmH ₂ O mm ⁻¹ solo).
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada (mm h ⁻¹).
SOL_BD.sol	Densidade aparente (úmida) (g.cm ⁻³).
SFTMP.bsn	Temperatura para ocorrer a precipitação de neve (°C).
Precipitation.pcp	Dados diários de precipitação (mm).
CN2.mgt	Curva número (adimensional).

CH_L2.rte	Comprimento do canal principal (km).
SURLAG.bsn	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (adimensional).
ALPHA_BF.gw	Fator do fluxo de base (dia).
NSE	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
R ²	Coefficiente de determinação
Q_{obs}	Vazão observada
$Q_{med_{obs}}$	Média da vazão observada no período
Q_{sim}	Vazão simulada pelo modelo
$Q_{med_{sim}}$	Média da vazão simulada no período
k	Coefficiente de recessão
Q_t	Leitura de vazão no início do período de recessão
Q_{t0}	Leitura de vazão no final do período de recessão
Q_{Bi}	Vazão oriunda do escoamento básico no dia presente
Q_{Bi-1}	Vazão oriunda do escoamento básico no dia anterior
Q_i	Vazão do canal no dia presente
C	Coefficiente de escoamento superficial médio
VBC_i	Vazão básica corrigida para o i-ésimo dia
VBE_i	Vazão básica estimada pelo modelo para o i-ésimo dia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	PROCESSOS HIDROLÓGICOS E RECURSOS HÍDRICOS	25
2.2	SÉRIES HISTÓRICAS E VAZÃO	29
2.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA	29
2.4	O MODELO SWAT	31
2.4.1	Conceitos e generalidades	31
2.4.2	Formulação do modelo SWAT	35
2.4.2.1	Dados climáticos requeridos	35
2.4.2.2	Balanço hídrico	35
2.4.2.3	Escoamento superficial	35
2.4.2.4	Evapotranspiração	36
2.4.2.5	Infiltração	37
2.4.2.6	Água no solo	37
2.4.2.7	Águas subterrâneas	38
2.4.2.8	Crescimento das plantas	39
2.4.3	Análise de sensibilidade e calibração semi-automática	40
3	HIPÓTESES	43
4	OBJETIVOS	45
4.1	OBJETIVO GERAL	45
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	45
5	MATERIAL E MÉTODOS	47
5.1	CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
5.2	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS	49
5.2.1	Modelo digital de elevação e delineamento da bacia hidrográfica	49
5.2.2	Uso da terra, parâmetros de solo e declividade	52
5.2.3	Escala temporais e gerador de dados climáticos	58
5.2.3.1	Precipitação	58
5.2.3.2	Demais dados climáticos	60
5.2.3.3	Gerador de dados climáticos	61
5.3	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	63
5.4	AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDROLÓGICA	67
5.5	SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS BÁSICOS OBSERVADOS E SIMULADOS PELO MODELO SWAT	68

6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
6.1	BALANÇO HÍDRICO ANUAL.....	71
6.2	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT.....	74
6.2.1	Calibração e validação do modelo na escala diária	74
6.2.2	Calibração e validação do modelo na escala mensal ...	84
6.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	96
6.4	CURVA DE PERMANÊNCIA.....	100
6.5	ANÁLISE DE IMPACTOS DO USO DO SOLO NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA DO ALTO CANOAS.....	103
6.6	SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS BÁSICO E SUPERFICIAL OBSERVADOS E ESTIMADOS PELO MODELO SWAT ATRAVÉS DE FILTRO NUMÉRICO.....	107
6.6.1	Escala diária	107
6.6.2	Escala mensal	113
7	CONCLUSÃO	119
8	RECOMENDAÇÕES	121
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

1 INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos engloba um conjunto de ações que objetivam permitir o uso múltiplo da água em qualidade e quantidade suficientes. Para que isso ocorra, o Brasil instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL, 1997) na qual estão previstos os instrumentos pelos quais estas ações devem ser colocadas em prática. Os principais instrumentos são a outorga do direito de uso, a cobrança pelo uso e o enquadramento dos corpos d'água em classes de qualidade.

De acordo a PNRH, a aplicação destes instrumentos deve acontecer no âmbito da bacia hidrográfica, ou seja, a bacia hidrográfica é a unidade espacial que agrega as ações de gestão. Os planos de bacias hidrográficas são, portanto, documentos que norteiam a gestão dos recursos hídricos nela existentes e deve ser elaborado por uma metodologia que considere os aspectos sociais, econômicos e hidrológico.

O comportamento hidrológico da bacia é parte de um sistema hídrico, interconectado, cujas entradas e saídas dos seus respectivos subsistemas podem desencadear desequilíbrios no sistema. Portanto, conhecer o comportamento hidrológico da bacia é fundamental para a construção do plano de bacia, onde serão apontadas as prioridades, as diretrizes, as metas e os prazos a serem observados pelas respectivas ações de gestão.

Para tanto, a técnica de modelagem hidrológica se mostra promissora como auxiliar na construção (ou mesmo de atualização) de um plano de bacia, pois tais modelos são representações formais da realidade. Os modelos são ferramentas de planejamento e tomada de decisão. Com eles é possível analisar cenários e avaliar os impactos das decisões, diminuindo os riscos de decisões incorretas, incoerentes ou inconsistentes facilitando assim, uma gestão eficiente dos recursos hídricos da bacia.

Uma vez validados, os modelos convertem-se em importantes ferramentas de gestão na medida em que auxiliam o entendimento dos processos hidrológicos relevantes, apontando as fragilidades hidrológicas da bacia. Estando conhecidas estas fragilidades, é possível sugerir diretrizes de gestão ao plano, as quais nortearão as ações do poder público e do comitê da bacia nas decisões.

Nesse sentido, observa-se uma carência de estudos para a bacia hidrográfica do Rio Canoas. As pesquisas que se observam para a área

visaram apenas à implantação e operação de reservatórios não sendo contributivas à construção do plano.

Tais aspectos revelam o quanto é importante haver estudos que levantem ou consolidem dados primários, e os apliquem em sistemas de suporte às decisões. Portanto, o trabalho realizado na bacia do Alto do Canoas e seus resultados, certamente, poderão contribuir também para a etapa de tomada de decisões com informações sobre o seu comportamento hidrológico.

No caso da bacia em questão, que ainda não conta com seu plano, Sá (2014) apontou a possibilidade da importância do escoamento no canal principal e também a contribuição do escoamento subsuperficial ou básico na manutenção das vazões na bacia do Alto Canoas. Esta sub-bacia se destaca na bacia do Canoas por ser a mais preservada, além de ter em seus domínios a nascente do Rio Uruguai e também ser uma importante região de recarga do aquífero Guarani.

As evidências apontadas por Sá (2014) serão estudadas de modo mais aprofundado através do modelo SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) de modo a contribuir com um conhecimento mais detalhado do sistema.

Este modelo é amplamente estudado no mundo e exige uma série de parâmetros físicos da bacia, modelo digital de elevação, dados hidrológicos e dados meteorológicos, sendo considerado um dos mais complexos e completos de uso popular, sendo este modelo de aquisição gratuita.

O SWAT é capaz de simular os diferentes processos hidrológicos ocorrentes na bacia hidrográfica bem como evapotranspiração, infiltração e escoamento de água possibilitando estudar os impactos dos diferentes usos da terra sobre o escoamento superficial e subterrâneo, além de permitir a análise de produção de sedimentos e qualidade da água (ARNOLD et. al., 2012). Dessa forma, pode-se perceber que o mencionado modelo possibilita que cenários sejam avaliados e que, inclusive, o escoamento de água possa ser observado de forma distribuída dentro da bacia hidrográfica.

O modelo SWAT, após adequadamente validado pode, inclusive, ser acoplado a um modelo climático e prever o comportamento hidrológico da bacia no futuro.

O objetivo deste trabalho foi estudar a bacia do alto canoas, utilizando um modelo hidrológico de base física.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS HIDROLÓGICOS E RECURSOS HÍDRICOS

A hidrologia é a ciência que trata do comportamento da água na terra, sua ocorrência, circulação e distribuição bem como suas relações com a vida. Ainda, engloba os conceitos de suas propriedades químicas e físicas. Já a hidrologia aplicada estuda os fatores envolvidos na produção dos recursos hídricos em qualidade e quantidade para os seres vivos (TUCCI, 2007). Neste momento, percebe-se a importância do ciclo hidrológico e sua unidade fundamental para seu estabelecimento, a bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica é uma unidade fisiográfica delimitada por divisores topográficos mais altos que o seu interior, embora possam existir pontos mais elevados que as bordas dentro da bacia. Seus limites separam a precipitação incidente para dentro da unidade e toda a drenagem da mesma sai por uma única foz.

Segundo Silveira et al. (2007, p. 35), “o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.”

E, associados ao ciclo hidrológico (Figura 1) se encontram todos os processos hidrológicos que promovem este dinamismo. Os principais seguem brevemente descritos.

A precipitação é a principal entrada de água em um sistema como uma bacia hidrográfica, sendo que, a partir dela decorrem os demais processos hidrológicos (BERTONI & TUCCI, 2001). Tem suas características regidas pelo volume de chuva (altura de chuva, normalmente em milímetros), intensidade (mm h^{-1}) duração (min ou h) e período de retorno (em anos).

Além disso, as chuvas constituem importante papel no ponto de vista conservacionista do solo, pois quanto maiores os volumes precipitados bem como suas intensidades, aliados a situação na qual se encontra o terreno, mais impactante será a precipitação sob a ótica da erosão hídrica.

Ainda segundo Bertoni & Tucci (2001), neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas diferentes de precipitação, as diferenças entre elas são os estados em que a água se encontra.

influenciada pela rugosidade do solo, declividade do terreno e manejo do solo. Esta parcela de água, oriunda da precipitação, não irá compor a enxurrada (TUCCI, 2007).

Já a retenção superficial é a lâmina de água que se acumula sobre um terreno quando este é atingido por um volume de precipitação, antes que o mesmo comece a escoar. Esta parcela da chuva não fica retida permanentemente na rugosidade do solo e, portanto, participada enxurrada. Os fatores que a influenciam podem ser listados como: tipo e quantidade de resíduos sobre o solo, rugosidade do solo, declividade do terreno, manejo da área e intensidade da chuva.

A infiltração de água no solo é a passagem da água da superfície para o seu interior, sendo dependente principalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar presentes originalmente no seu interior (SILVEIRA et. al., 2007). A infiltração é o processo hidrológico mais importante para o balanço hídrico, pois é este que vai definir a forma do hidrograma.

Este processo ocorre devido ao fato de o solo ser um meio poroso. Sob uma determinada precipitação, há a infiltração de toda sua intensidade até que haja a saturação da superfície do solo. Conforme a saturação ocorre em maiores profundidades, a taxa de infiltração vai diminuindo até chegar a um valor residual (taxa de infiltração básica).

A infiltração, bem como a percolação de água no solo são comandadas pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade (SILVEIRA, 2007). Tendo ambas diferentes importâncias quando em distintas situações as quais se apresentam no solo: A tensão capilar é muito mais importante quando o solo se encontra com umidade menor que a da saturação, diferentemente da gravidade, que comanda o movimento da água no solo quando este se encontra saturado.

O primeiro tópico que pode ser ilustrado com relação ao papel da infiltração é a definição do balanço hídrico na zona das raízes o qual é determinado por este processo hidrológico. Dessa forma, o seu conhecimento e sua relação com as características do solo são de fundamental importância para o eficiente manejo do solo e da água nos cultivos agrícolas (REICHARDT, 1996).

A água infiltrada que não é aproveitada pelos vegetais percola até o lençol freático servindo, posteriormente para alimentar as vazões dos cursos d'água (SILVEIRA, 2007).

Vencidas todas as demais abstrações e processos hidrológicos, a parcela de água que não infiltra a partir do momento em que o solo

torna-se saturado, gera o escoamento superficial. Este processo hidrológico é influenciado por todos os fatores que controlam os demais processos. O escoamento superficial possui, conhecidamente, sua importância no ciclo hidrológico, porém, é o processo mais impactante em termos de erosão hídrica, trazendo consigo aspectos não desejáveis como a perda de solo e nutrientes.

Podem-se enumerar também, as inundações, decorrentes das enxurradas as quais geram problemas frequentemente ao homem, sendo necessário para a minimização destes problemas um correto dimensionamento de obras como pontes, bueiros, barragens, etc.

Os processos hidrológicos ora apontados são, em termos gerais os responsáveis pelo ciclo hidrológico e, portanto, pela disponibilidade hídrica.

De acordo com Marcon (2013), o abastecimento de água potável para utilização básica e industrial, geração de energia hidrelétrica, irrigação, controle de cheias e secas, navegação fluvial, assimilação e diluição de esgotos sanitários e de efluentes industriais e preservação ecológica são alguns dos muitos usos e controles de recursos hídricos. Com o passar do tempo, estes diferentes usos e suas quantidades em volume aumentaram significativamente de forma proporcional a velocidade em que as atividades econômicas se desenvolveram.

Segundo Sá (2014), no Brasil, a proporção dos diferentes usos é assim distribuída: a irrigação é responsável por cerca de 68% das retiradas ou derivações de água, os usos industriais por 23%, os usos domésticos e os serviços urbanos por cerca de 8% e os outros usos respondem pelos restantes 1%.

O país, apesar de deter 12% do potencial hídrico potável do planeta, não encontra uma distribuição homogênea destes recursos em seu território. Potencial este que tampouco está arranjado de forma proporcional às concentrações populacionais (SÁ, 2014).

Dessa forma, ao se conhecer a realidade em que a sociedade se encontra inserida, esta passa a ter o dever de utilizar este recurso de forma racional. No entanto, o papel de definir em quais termos se dá esta racionalidade é da comunidade científica que deve gerar o conhecimento necessário para fomentar as decisões a ser tomadas a respeito. Nesse contexto a avaliação da qualidade e da quantidade hídrica no espaço e no tempo é de grande importância para o gerenciamento da bacia hidrográfica, unidade esta ideal para a administração dos recursos em função das particularidades atreladas.

2.2 SÉRIES HISTÓRICAS E VAZÃO

A partir do escoamento superficial e juntamente aos escoamentos subsuperficial (escoamento lateral da água que infiltra nas camadas interiores do solo para o canal) e de base (fração da vazão do curso d'água mantido pelos aquíferos rasos) se dá o abastecimento dos canais.

Uma vez compondo os canais, os volumes de água escoam até o exutório da bacia hidrográfica onde podem ser quantificados através de estações fluviométricas para as mais variadas finalidades (SÁ, 2014).

A disponibilidade de séries de dados hidrológicos confiáveis é fundamental para o desenvolvimento de projeto de estruturas hidráulicas. Séries longas de registros de vazões são de grande importância para a estimativa de períodos de retorno e para o planejamento de ações mitigadoras de efeitos de cheias e secas (MARCON, 2013).

Segundo Mendonça (2001), o planejamento de medidas não estruturais de solução ou minimização de problemas relacionados com os recursos hídricos depende também da avaliação da quantidade de água.

Neste momento, ao se conhecer adequadamente os limites da área de contribuição da unidade fisiográfica e sendo possível o acesso aos demais dados requeridos, surge como opção a modelagem da bacia hidrográfica em questão, com a finalidade de conhecer de forma mais aprofundada suas particularidades e assim, auxiliar nos processos de tomada de decisão.

2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Na abordagem conceitual (caixa-preta), a bacia hidrográfica ainda é conhecida pelos parâmetros de sua modelagem como uma entidade individualizada, na qual as entradas são representadas pelo excesso de precipitação e as saídas por hidrogramas na foz, sem a variação espacial da bacia e das fases intermediárias do ciclo (MAMILLAPALLI et al., 1996). Tais pressuposições, consideradas simplificadas do fenômeno, fazem com que o modelo não crie uma identificação espacial efetiva (BIAN, 1997) e que os numerosos programas que os processam tenham características particulares, restritas a regiões geográficas específicas (TAYLOR, et. al., 1999). As

áreas dessas regiões necessariamente, também, não podem ser muito extensas.

De forma oposta, segundo Maidment (1993), para os modelos distribuídos, procura-se captar o máximo da variabilidade espacial da bacia hidrográfica, segmentando-a em sub-bacias ou em áreas menores com formas definidas, onde os parâmetros são considerados uniformemente. Dessa forma, o ciclo hidrológico é simulado em cada sub-área e o fluxo resultante é carreado na direção da foz. Caso um modelo utilize um elemento menor do que o tamanho da escala do processo físico, este será descrito como distribuído, caso contrário, quando a escala do modelo for a mesma do processo (a totalidade da bacia), este será um modelo agregado (DEVANTIER & FELDMAN, 1993).

São significativas as discussões na literatura referentes às questões de escala espacial e temporal, as quais são inerentes aos processos ambientais (MENDIONDO & TUCCI, 1997; BLOSCHL & GRAYSON, 2000; COLLISCHONN & TUCCI, 2001; MULLIGAN & WAINWRIGHT, 2004; COLLODEL, 2009; SANTOS, 2009).

O julgamento do observador limita a interpretação do que se analisa, portanto, a generalização ou especialização dos dados espaciais estaria restrita a um grau de resolução podendo ser vista como pessoal (GOODCHILD, 1996). Variações no modelo digital do terreno, na classe de solo, no uso do solo, na geometria dos canais ou da bacia devidas à escala podem gerar diferentes resultados pelos modelos. Além disso, o efeito gravitacional no fluxo da água poderia ser mais significativo em escalas grandes (ex. 1:1000, 1:2000) do que em escalas pequenas (ex.: 1:500.000, 1:1.000.000), o que implicaria na adoção da superfície geoidal como referencial das altitudes.

Ainda na concepção do entendimento e aplicação da escala, segundo Collischonn & Tucci (2001) um dos grandes desafios da Hidrologia está no entendimento da escala em que os processos hidrológicos ocorrem. Em escalas grandes, por meio de experimentos de campo, podem se estudar ocorrências como infiltração e escoamento em meio não saturado. No entanto, o escoamento num rio resulta da combinação de vários fenômenos que se alteram na medida em que varia a escala da bacia. Também como desafio, pode ser concebida a representação de processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais (MENDIONDO & TUCCI, 1997).

Os modelos hidrológicos são desenvolvidos, dentre outros objetivos, visando estabelecer os impactos que os diferentes tipos de

ocupação de solo geram à bacia hidrográfica. Atualmente, existem diversos modelos os quais são passíveis de serem rodados em diferentes programas, estes são obtidos por meio de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação real (BALDISSERA, 2005).

Tucci et al. (2003) estudaram hidrológicamente a bacia do Rio Canoas com objetivo de aplicar o modelo hidrológico distribuído IPH-II na bacia do rio Uruguai para previsão de vazões afluentes à usina de Machadinho, utilizando a série de maio de 2001 a maio de 2003. Em outra pesquisa, aplicou-se um método multi-objetivo de calibração automática de parâmetros com dados do posto fluviométrico Vila Canoas no rio Canoas e de precipitação dos postos pluviométricos Despraidado, Urubici e Vila Canoas para o período de 1981 a 1984 (COLLISCHONN & TUCCI, 2005). ANDREOLLI (2006) avaliou o modelo IPH-II para a previsão de vazão em tempo real integrando a previsão de precipitação também na seção da usina de Machadinho, no rio Uruguai. Estudos realizados ultimamente remetem a CURTARELLI et al. (2010) que realizaram o balanço hídrico do Alto Canoas.

Sá (2013) estudou a mesma bacia hidrográfica do presente trabalho com o intuito de aplicar o modelo TOPMODEL e testar sua viabilidade para grandes bacias, já que este foi desenvolvido para as pequenas e médias.

Quanto ao modelo SWAT, este passou a ser aplicado no Brasil para o estudo de bacias hidrográficas no ano de 1999, tendo seu ápice de publicações no ano de 2010, com mais de 70 publicações, entre teses, dissertações e artigos (GARBOSSA et al., 2011).

Lubitz (2009) e Marcon (2013) testaram o modelo SWAT em bacias hidrográficas do sul do país para a simulação das vazões em suas seções de saída. Para a bacia hidrográfica do Alto Canoas, ainda não existem trabalhos publicados os quais tenham utilizado o modelo SWAT.

2.4 O MODELO SWAT

2.4.1 Conceito e generalidades

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service e pela Texas A&M University* no ano de 1996 e projetado para estudar de médias a grandes bacias com vistas a obedecer uma continuidade no tempo e, portanto, simular longos períodos.

O SWAT foi elaborado para projetar o impacto das alterações no uso, no tipo e no manejo do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos, carga de poluentes e qualidade da água (LELIS et al., 2012). Segundo Guerreiro et al. (2005) o SWAT é um modelo distribuído de simulação contínua no tempo onde as variáveis hidrológicas são distribuídas no espaço.

Baldisera (2005) menciona que este modelo exige uma grande quantidade de variáveis de entrada as quais se relacionam com as características físicas da bacia. De acordo com Lelis et al. (2012) o modelo SWAT é sensível à qualidade dos dados referentes ao solo. Dessa forma, a acurácia do modelo está diretamente relacionada aos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográfica e do quão representativos eles são.

Este modelo é dividido em quatro componentes: produção de água, produção de sedimentos, propagação no canal e propagação no reservatório. Ainda, é utilizada a metodologia do *Soil Conservation Service* (SCS) para o cálculo e calibração automática dos parâmetros hidrológicos (OLIVEIRA, 1999).

Machado (2002) relata que o modelo é baseado em características físicas da bacia, podendo ser usado para modelar bacias sem monitoramento (neste caso, sem a capacidade de avaliar o ajuste do modelo), usa dados de entrada normalmente disponíveis, é computacionalmente eficiente para operar sobre médias e grandes bacias (de área maior que 1.000 km²) e é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos (acima de 100 anos) de forma a computar os efeitos das alterações no uso do solo.

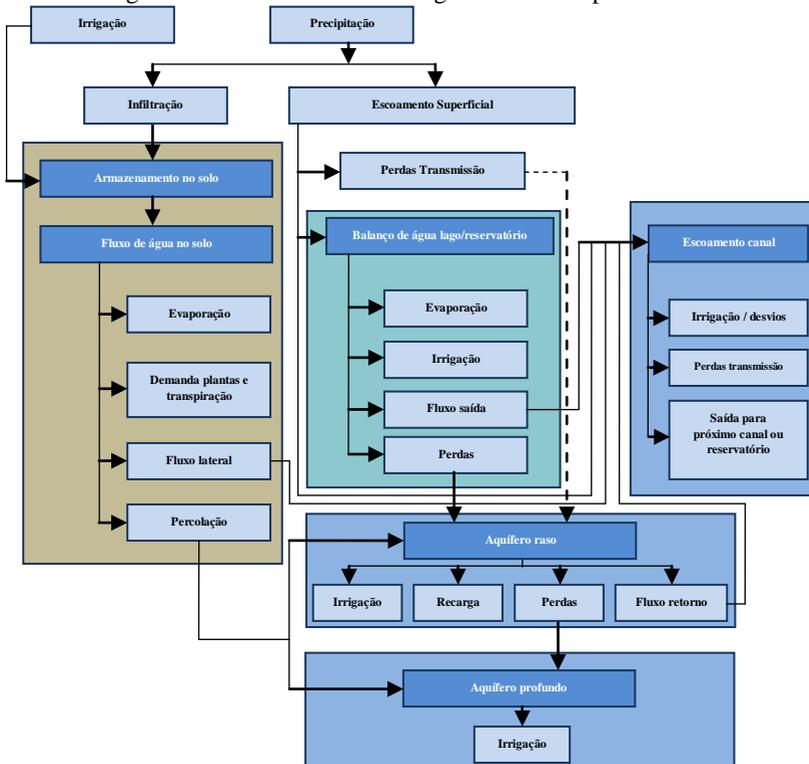
Segundo Lubitz (2009), o SWAT trabalha com a divisão da bacia em sub-bacias, sendo estas posteriormente segmentadas em unidades de resposta hidrológica. A delimitação das sub-bacias normalmente é feita com base nos pontos de coleta de dados ou pontos de intersecção de cursos de água, e pode ser definida através de análise topográfica.

Já as Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrological Response Units - HRU*) podem ser definidas como a associação de sub-regiões com comportamentos hidrológicos homogêneos ou com elevado grau de homogeneidade em termos de balanço hídrico, escoamento superficial, infiltração e recarga para os lençóis freáticos além de trocas de energia, água e vapores com a atmosfera a partir da dependência dos processos hidrológicos em relação as feições básicas da paisagem (GREHS, 2003).

A subdivisão da bacia em áreas com combinações únicas faz com que o modelo apresente diferenças nos processos hidrológicos relacionados aos diferentes usos e solos. Para cada HRU o escoamento é calculado e propagado para se obter o escoamento total da sub-bacia e, como consequência, aumentar a precisão das simulações e melhorar a descrição física do balanço de água na bacia (MORO, 2005). Ainda segundo Meira Neto et al. (2011), por meio da precipitação diária, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e o escoamento de retorno do aquífero raso se obtém a produção de água em cada HRU. A Figura 2 demonstra os processos hidrológicos simulados pelo SWAT em uma HRU.

Paiva & Paiva (2006) relacionam os processos hidrológicos simulados pelo modelo: interceptação, infiltração, redistribuição da água no solo, evapotranspiração, escoamentos sub-superficial e superficial, armazenamento, escoamento em canais principais e tributários e vazão de base. Segundo os autores, o volume de escoamento superficial é calculado através do método da Curva Número da *Soil Conservation Service* modificado, ou pelo método de infiltração de Green & Ampt. Quanto a evaporação real do solo, a mesma é obtida por meio de funções exponenciais da profundidade do solo e sua quantidade de água, já a transpiração dos vegetais é calculada através de um modelo linear da evapotranspiração potencial e índice de área foliar, a qual varia em função do tipo de vegetação que é informada ao modelo como dado de entrada.

Figura 2 - Fases do ciclo hidrológico simuladas pelo SWAT.



Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2005).

As vantagens do modelo SWAT se encontram em representar quase todos os processos envolvidos na transformação da precipitação em vazão, permitir a divisão da bacia hidrográfica segundo critérios de distribuição espacial das chuvas e características físicas de uso da terra e classe de solo e, os parâmetros podem ser obtidos a partir de estudos prévios (LUBITZ, 2009).

Segundo Sérgio et. Al. (2014) o SWAT é um instrumento eficiente para a representação dos fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e assim, sua aplicação tem potencial como ferramenta de apoio a tomada de decisões para o planejamento da região e implantação de políticas públicas.

2.4.2 Formulação do modelo SWAT

A simulação hidrológica do modelo é decomposta entre fase terrestre e fase de canal alocada dentro de cada HRU. A fase terrestre é subdividida em sete módulos: clima, hidrologia, cobertura vegetal/crescimento de plantas, erosão, nutrientes, pesticidas e práticas de manejo. A fase de canal é subdividida em propagação de onda e qualidade da água. A fase terrestre do SWAT compreende a determinação do balanço hídrico da bacia, onde o armazenamento de água no solo para determinado momento leva em conta a condição inicial antecedente somado à precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração e recarga de aquífero.

A seguir serão apresentadas as etapas de cálculo do modelo, descritas por Arnold et al. (2012), referentes a modelagem do balanço hídrico.

2.4.2.1 Dados climáticos requeridos

Os dados climáticos de entrada requeridos pelo modelo são precipitação (mm), temperaturas máximas e mínimas (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar (MJ m⁻²) e velocidade do vento (m s⁻¹).

2.4.2.2 Balanço hídrico

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

Onde, SW_i : quantidade final de água no solo (mm); SW_0 : quantidade inicial de água no solo (mm); t : tempo (dias); R_i : precipitação (mm); Q_i : escoamento superficial (mm); ET_i : evapotranspiração (mm); P_i : percolação (mm); QR_j : escoamento lateral (mm).

2.4.2.3 Escoamento superficial

O SWAT utiliza dois métodos para o cálculo do escoamento superficial: Método de Green & Ampt (1911) e o método da Curva Número Modificado (1972), explicado a seguir:

$$Q_s = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)} \quad (2)$$

Onde, Q_s : escoamento acumulado ou excesso de chuva (mm); R : precipitação diária (mm), I_a : abstração inicial (armazenamento superficial, interceptação, infiltração - mm); S : parâmetro de retenção.

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Onde, CN : Curva número, função da permeabilidade, uso e histórico de umidade do solo. Curva número varia não linearmente entre 1 (não-saturado) e 100 (saturado).

$$S = S_{prev} + E_0 \cdot \exp \left(\frac{-cncoef - S_{prev}}{S_{max}} \right) - R_{day} - Q_{surf} \quad (4)$$

Onde, S : parâmetro de retenção (para solos rasos); S_{prev} : parâmetro de retenção para o dia anterior (mm), E_0 : evapotranspiração potencial para o dia (mm d^{-1}); $cncoef$: coeficiente usado para o cálculo de CN diário, o qual é função da evapotranspiração; S_{max} : valor máximo que o parâmetro de retenção pode alcançar em um dado dia (mm); R_{day} : precipitação para o dia (mm); Q_{surf} : escoamento superficial (mm). O valor inicial do parâmetro de retenção é definido como $S = 0,9S_{max}$.

$$Q_s = \frac{(R - 0,2S)^2}{(R + 0,8S)} \quad (5)$$

Para R maior que $0,2S$ há a presença de escoamento superficial.

2.4.2.4 Evapotranspiração

O SWAT calcula evapotranspiração por três métodos dependendo da disponibilidade de dados. Hargreaves (1985), Priestley (1972) e Penman-Monteith (1965). Sendo que na ocasião de maior disponibilidade de dados o método utilizado é o Penman-Monteith.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (6)$$

Onde, λ : densidade do fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); E : taxa de evaporação profunda (mm d^{-1}); Δ : rampa da curva pressão-temperatura do vapor de saturação, de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); H_{net} : radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G : densidade de fluxo de calor à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); ρ_{air} : densidade do ar (kg m^{-3}); c_p : calor específico à pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); e_z^0 : pressão de vapor de saturação do ar à altura z (kPa); e_z : pressão de vapor de água do ar à altura z (kPa); γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); r_c : resistência do dossel vegetativo (s m^{-1}) e; r_a : resistência de difusão da camada de ar (s m^{-1}).

2.4.2.5 Infiltração

Como o método da Curva Número, usado para a obtenção do escoamento superficial, trabalha em passo de tempo diário, não se faz possível modelar a infiltração diretamente com este método, e assume-se que a quantidade de água que infiltra é a diferença entre a precipitação e o escoamento superficial. O método de Green & Ampt, também utilizado pelo SWAT como metodologia de cálculo de infiltração, é capaz de descrever a evolução da infiltração, mas são necessários dados de entrada em intervalo de tempo curto.

2.4.2.6 Água no solo

$$AWC = FC - WP \quad (7)$$

Onde, AWC : capacidade de água disponível; FC : quantidade de água à capacidade de campo (quando o solo totalmente úmido é drenado por aproximadamente dois dias); WP : quantidade de água no ponto de murcha permanente (quando plantas murcham e não se recuperam se suas folhas são mantidas em umidade atmosférica durante a noite).

$$WP_{ly} = 0,40 \cdot \frac{m_c \cdot \rho_b}{100} \quad (8)$$

Onde, WP_{ly} : quantidade de água no ponto de murcha (fração do volume total do solo); m_c : percentual de argila da camada (%) e ρ_b : massa específica aparente do solo na camada (Mg m^{-3}).

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (9)$$

Quando a quantidade de água em determinada camada do solo ultrapassa a capacidade de campo, ocorre a percolação. $w_{perc,ly}$: quantidade de água que percola para uma camada inferior em um determinado dia (mm); $SW_{ly,excess}$: volume drenável de água no solo em um determinado dia (mm); Δt : extensão do passo de tempo (h) e; TT_{perc} : duração da percolação (h).

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (10)$$

O escoamento lateral ocorre quando a água que percola verticalmente encontra uma camada impermeável e se acumula, formando uma zona saturada, que é a origem do escoamento. Q_{lat} : descarga de água da rampa de saída (mm dia⁻¹); $SW_{ly,excess}$: volume drenável da água armazenada na zona saturada da rampa por unidade de área (mm), K_{sat} : condutividade hidráulica saturada (mm h⁻¹); slp : declividade da rampa (m m⁻¹); ϕ_d : porosidade drenável da camada de solo (mm mm⁻¹); L_{hill} : comprimento de rampa (m).

$$TT_{lag} = 10,4 \cdot \frac{L_{hill}}{K_{sat,mx}} \quad (11)$$

Onde, TT_{lag} : tempo de escoamento lateral (dias); L_{hill} : comprimento de rampa (m), $K_{sat,mx}$: condutividade hidráulica saturada para a camada mais alta do perfil (mm h⁻¹).

2.4.2.7 Águas subterrâneas

São as águas em camadas saturadas, sob pressão maior que a atmosférica. O SWAT modela dois sistemas, denominados aquífero raso e aquífero profundo. O aquífero raso contribui com o escoamento básico para o canal. A água que percola ao aquífero profundo é eliminada do sistema.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (12)$$

Onde, $aq_{sh,i}$: quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm); $aq_{sh,i-1}$: quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm); $w_{rchrg,sh}$: quantidade de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm); Q_{gw} : escoamento básico ao canal no dia i (mm); w_{revap} : quantidade de água indo para a zona não saturada do solo em resposta às deficiências de água no dia i (mm); $w_{pump,sh}$: quantidade de água retirada do aquífero raso por bombeamento no dia i (mm).

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchrg,sh} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad (13)$$

Equação usada para calcular o escoamento básico ($Q_{gw,i}$) quando este alcança o canal, situação em que a água armazenada no aquífero raso excede a um limiar pré-estabelecido. Onde, α_{gw} : constante de recessão do escoamento de base (se trata do mesmo parâmetro físico ALPHA_BF); Δt : intervalo de tempo (1 dia); $w_{rchrg,sh}$: quantidade de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm).

$$\alpha_{gw} = \frac{2,3}{BFD} \quad (14)$$

Onde, BFD : número de dias de escoamento de base para a bacia.

$$w_{revap,mx} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (15)$$

A água que alcança o aquífero raso pode ainda retornar à zona não saturada por capilaridade ou através de plantas com raízes profundas, num fenômeno identificado pelo SWAT como *revap*. $w_{revap,mx}$: máxima quantidade de água movendo para a zona não saturada em resposta a deficiências de água (mm); β_{rev} : coeficiente revap (GW_REVAP no SWAT); e E_0 : evapotranspiração potencial para o dia (mm).

2.4.2.8 Crescimento das plantas

No intuito de simular o crescimento vegetal de todos os tipos de plantas, o SWAT utiliza o modelo EPIC simplificado (*Environmental Policy Integrated Climate Model*), desenvolvido por Williams (1995).

O modelo calcula a biomassa potencial através da seguinte expressão:

$$\Delta bio = RUE \cdot 0,5 \cdot H_{dia} \cdot (1 - \exp[-k_l \cdot LAI]) \quad (16)$$

Onde, Δbio : biomassa potencial; RUE : eficiência da planta no uso da radiação ($0,1 \text{ g MJ}^{-1}$); H_{dia} : incidência solar total (MJ m^{-2}); $0,5 \cdot H_{dia}$: radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ m^{-2}); k_l : coeficiente de extinção da luz e; LAI : índice de área foliar.

O modelo EPIC simplificado trata o desenvolvimento fenológico dos vegetais como função de unidades de calor. Através dele se assume que cada planta possui uma temperatura de base, abaixo da qual a planta não se desenvolve, uma temperatura ótima, e uma temperatura máxima, que quando superada também faz cessar o crescimento. A maturidade é alcançada pela planta quando um valor de unidades de calor estipulado é alcançado. Esta maturidade será atingida quando a soma das diferenças entre as temperaturas médias diárias e a temperatura de base da planta alcançar o valor de unidade de calor estabelecido.

2.4.3 Análise de sensibilidade e calibração semi-automática

Como ferramenta para análise da bacia hidrográfica, e consequentemente à sua gestão, um método interessante de avaliação das variáveis que contribuem ao modelo é a análise da sensibilidade. Esta procura determinar o efeito da variação de um determinado item no seu valor final, ou seja, ela determinará o impacto da variação do parâmetro desejado no valor de saída do modelo.

A análise de sensibilidade dos parâmetros físicos do modelo, no presente trabalho, foi realizada com o auxílio do programa SWAT-CUP. Neste programa, a sensibilidade é analisada por meio de ferramenta específica a qual possibilita identificar quais parâmetros são mais sensíveis ou os que mais alteram a variável que se deseja calibrar no modelo. Assim, normalmente, as variáveis identificadas como sensíveis são utilizadas na calibração.

A sensibilidade dos parâmetros físicos é determinada calculando-se através do sistema de múltipla regressão que é exposto a seguir (Equação 17). Este sistema realiza uma análise de regressão por meio do método *Latin hypercube* o qual confronta o parâmetro selecionado com a sua resposta nos valores da variável de interesse.

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (17)$$

O teste t é então usado para identificar a significância relativa de cada parâmetro b_i . As sensibilidades encontradas acima são estimadas através das mudanças médias nos valores da variável de interesse resultantes das alterações em cada parâmetro físico, enquanto todos os outros parâmetros físicos estão mudando (ABBASPOUR, 2014).

O método *Latin Hypercube* é baseado na Simulação de Monte-Carlo, eliminando a necessidade de incontáveis simulações requeridas através de um método de amostragem estratificada que permite uma estimação eficiente das estatísticas de saída. A amplitude de cada parâmetro é dividida em N faixas, e então o modelo faz uma combinação randômica dos parâmetros, sendo que cada faixa é testada uma única vez (LUBITZ, 2009).

Para utilização dos modelos é necessário ter ciência do desempenho dos mesmos. Para isso, utiliza-se a estatística para a avaliação da sua calibração. Após esta etapa, o modelo é validado a partir de uma nova série de dados, indicando se o modelo é capaz de reproduzir a série de dados não utilizada em sua calibração (LELIS et al., 2012), técnica esta denominada de validação cruzada.

No presente trabalho, além da análise de sensibilidade, a calibração semi-automática também aconteceu através do SWAT-CUP. Este programa foi criado com o objetivo de auxiliar na calibração do modelo SWAT (MARCON, 2013). O SWAT-CUP utiliza a metodologia GLUE e os algoritmos PARASOL, SUFI-2, MCMC para calibração semi-automática e análise de incertezas do SWAT (ABBASPOUR, 2014).

De acordo com Abbaspour (2014), no SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) levam-se em conta para a análise de incerteza todas as suas fontes, como a incerteza em variáveis de entrada, os conceitos do modelo e as incertezas nos parâmetros e nos dados medidos. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por uma medida referida como o *P-factor*, que é a percentagem dos dados medidos delimitadas pela incerteza de predição de 95% (95PPU).

Neste método, o parâmetro de incerteza é descrito com uma variabilidade na distribuição uniforme do parâmetro *hypercube*. A

amostragem através do *Latin hypercube* é utilizada para traçar o parâmetro independente fixo (ABBASPOUR, 2014).

Outra medida que busca quantificar a eficácia de uma análise de calibração e incerteza é o *R-factor*, que é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos (ABBASPOUR, 2014).

Segundo Abbaspour (2014), no SUFI-2, o *P-factor* vai de 0 a 100% e o *R-Factor* 0 a infinito. A combinação de *P-Factor* igual a 1 e *R-Factor* zero, corresponde exatamente aos dados observados. No entanto, um balanço entre os dois fatores deve ser adotado.

Ainda, Abbaspour (2014) descreve as etapas do SUFI-2, quais sejam:

- Passo 1: a função objetivo é definida (Nasch-Sutcliffe e/ou R^2 , por exemplo);
- Passo 2: os parâmetros são distribuídos entre a região de máximo e mínimo valores;
- Passo 3: análise de sensibilidade em que os parâmetros são mantidos constantes, enquanto um deles tem seu valor alterado para dentro da faixa limite. Os resultados são plotados visando-se observar os efeitos das mudanças de cada parâmetro;
- Passo 4: é rodado o programa com a técnica SUFI-2 selecionada;
- Passo 5: avaliação das simulações utilizando a função objetivo (coeficiente) escolhido.

Segundo os próprios desenvolvedores do programa, Abbaspour et. al. (2007), o método SUFI-2 é mais vantajoso em função de que permite trabalhar com um grande número de parâmetros na calibração do modelo. Adicionalmente, o presente método se destaca por se tratar de um método similar ao Bayesiano inverso, o qual combina otimização da função objetivo e análise de incerteza.

3 HIPÓTESES

A hipótese presente desta pesquisa é de que as vazões na bacia do Alto Canoas são sensíveis ao escoamento no canal e a contribuição dos escoamentos subsuperficial ou básico. Esta hipótese toma por base a significância dos parâmetros ChVel e M do modelo TOPMODEL calibrado para esta bacia por Sá (2014).

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

- i. Avaliar os processos hidrológicos que contribuem para as vazões da bacia hidrográfica do Alto Canoas, visando gerar subsídios para sua gestão e suporte a tomada de decisões.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

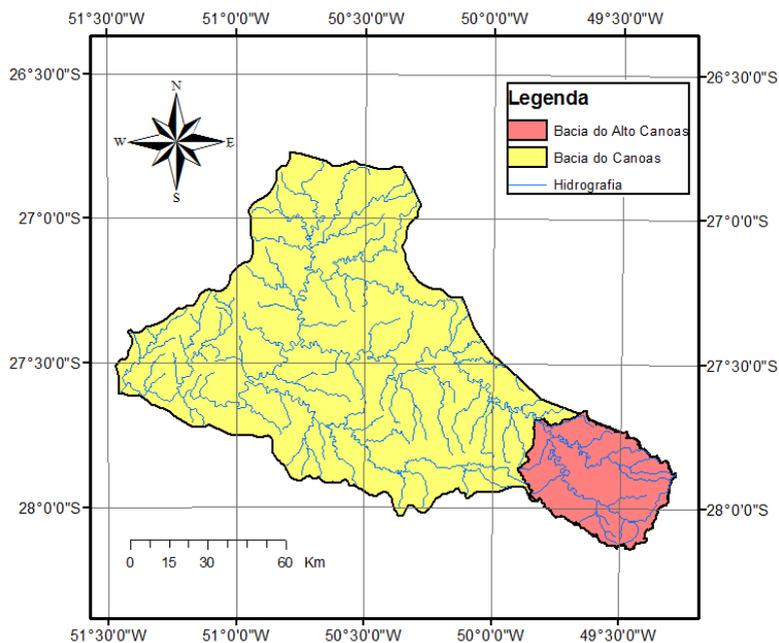
- i. Avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT na representação dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica do Alto Canoas;
- ii. Avaliar o desempenho do modelo SWAT nas escalas diária e mensal;
- iii. Avaliar o impacto do uso e ocupação do solo com o modelo SWAT sobre a vazão total nas escalas diária e mensal;
- iv. Avaliar as vazões básicas, obtidas do hidrograma observado, em relação às vazões básicas, obtidas do hidrograma simulado pelo modelo SWAT.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para o estudo foi a bacia hidrográfica do Alto Canoas, localizada no Planalto Serrano de Santa Catarina, na região mais a leste da bacia hidrográfica do Canoas, entre os paralelos 27° 39' e 28° 08' de latitude Sul e entre os meridianos de 49°45' e 49° 16' de longitude Oeste. A Figura 3 permite observar a localização da bacia hidrográfica do Alto Canoas em relação a bacia do Canoas.

Figura 3 - Situação da bacia hidrográfica do Alto Canoas em relação a bacia hidrográfica do Canoas.

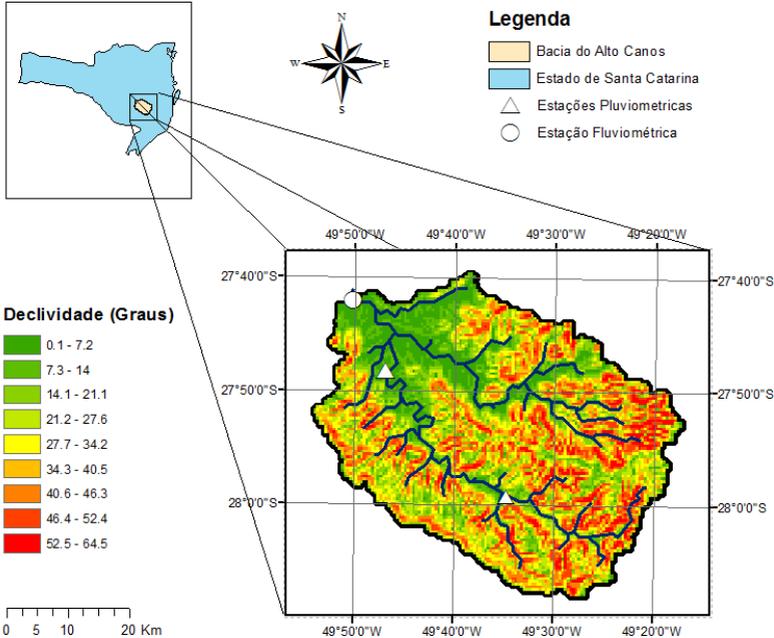


Fonte: produção do próprio autor.

A bacia do Alto Canoas, a qual detém a nascente do Rio Canoas, conta com uma área de drenagem de 1.973,61 km² e compreende quatro municípios: Bom Retiro, Bocaina do Sul, Rio Rufino e Urubici. Esta unidade fisiográfica pertence à grande bacia do

rio Uruguai. A área de estudo possui altitudes variando de 838 a 1.818 m com um relevo bastante acidentado, como é possível observar na Figura 4, onde a declividade chega a 64,5° em alguns locais.

Figura 4 - Localização da área de estudo e seu mapa de declividades.



Fonte: Sá (2014).

Ainda, a bacia hidrográfica do Alto Canoas está contida na Região Hidrográfica (RH) 4, segundo a classificação que divide o Estado em Regiões Hidrográficas, visando o planejamento, gestão e gerenciamento dos recursos hídricos catarinenses. A RH 4 denominada Planalto de Lages, com uma área de 22.808 km², engloba as bacias hidrográficas Canoas e Pelotas (SANTA CATARINA, 1998).

De acordo com Santa Catarina (2006), a bacia hidrográfica do Canoas possui variações na temperatura média anual de 13,40 a 16,46° C, enquadrada na classificação de Köppen como predominantemente Subtropical Cfb - clima temperado úmido, ou seja, apresenta estações do ano bem definidas, com verões quentes e invernos frios. A umidade

relativa média anual na bacia mencionada varia de 70,60 a 83,12%, com precipitação anual total de 1650 mm.

Ainda, Santa Catarina (2006) classificou o relevo na RH 4 como forte-ondulado e ondulado. Do mesmo modo, definiu os solos predominantes como profundos, mediamente profundos e rasos, com pedregosidade superficial. Origem dos solos sedimentar, pouco férteis e ácidos.

Os solos da bacia utilizada no estudo bem como o uso da terra na região, serão tratados de forma mais detalhada adiante.

5.2 CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

5.2.1 Modelo digital de elevação e delineamento da bacia hidrográfica

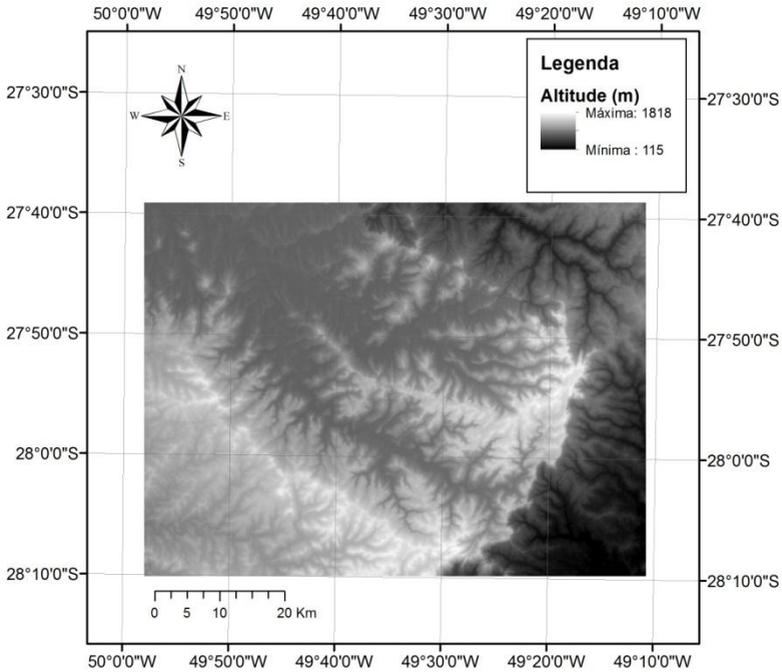
O modelo SWAT foi desenvolvido nos Estados Unidos da América, onde uma simulação hidrológica com o modelo em qualquer bacia hidrográfica de seus domínios é realizada de forma menos onerosa em função do banco de dados de solo e dados climáticos (através de uma base de dados de 1.041 estações climáticas espalhados por todo o território) que acompanha o programa.

No entanto, para o estudo de bacias em regiões fora daquele país, existe a necessidade da inserção das informações acima descritas no banco de dados, além das demais informações, as quais serão mencionados a seguir.

Na entrada dos dados, após a criação de um novo projeto na extensão ArcSWAT (Versão 2012.10_1.15) do programa ArcGIS 10.1, a primeira informação incluída na modelagem foi o arquivo com o modelo digital de elevação da área que compreendesse a bacia hidrográfica. O MDE utilizado foi publicado pela EPAGRI através do projeto SRTM (EPAGRI, 2012) e possui resolução espacial horizontal de 30m (escala 1:120.000) e vertical de 16 m. O recorte com o modelo digital de elevação aplicado é exposto na Figura 5.

Com a inserção do arquivo mencionado já realizada, foi definida a referência espacial do MDE (SIRGAS 2000 / UTM, zona 22 S) e calculadas as direções de fluxo e acumulação da água. Ainda, foram gerados automaticamente, através do sistema, os canais e exutórios das sub-bacias. Cada exutório é criado de forma automática pelo sistema quando da união de dois canais, independentemente da ordem desses.

Figura 5 - Modelo digital de elevação da área de estudo.

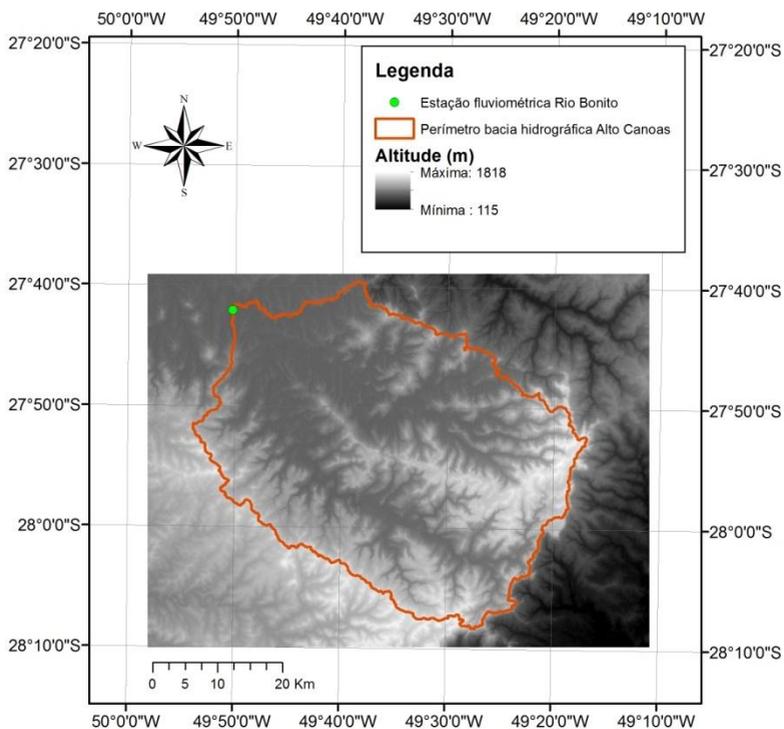


Fonte: EPAGRI (2012).

A etapa seguinte consistiu na definição do exutório da bacia hidrográfica o qual foi inserido manualmente visando a posterior definição do perímetro da mesma. Tal seção de saída foi escolhida por ser onde está localizada a estação fluviométrica Rio Bonito.

Na sequência, procedeu-se então o delineamento dos divisores de água da bacia com o comando *Delineate watershed*. Nesse caso, apesar de toda a operação estar se realizando na extensão ArcSWAT, esta utiliza o pacote ArcHidro para a delimitação da bacia hidrográfica. A Figura 6 mostra o modelo digital de elevação juntamente a estação fluviométrica Rio Bonito, exutório da bacia. A figura ilustra também o perímetro da bacia hidrográfica, definido a partir deste ponto.

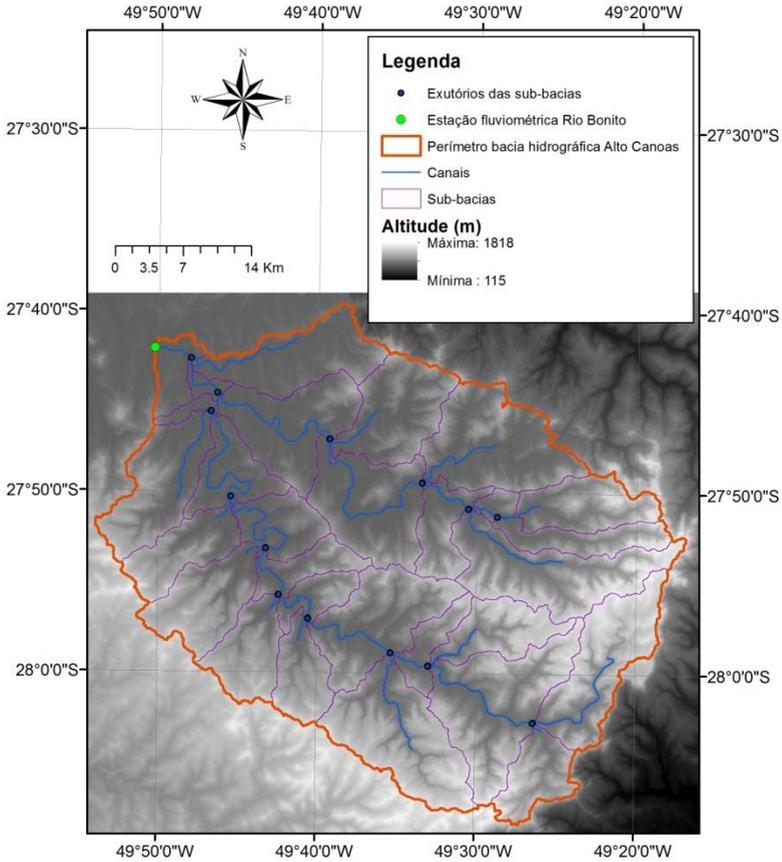
Figura 6 - Perímetro da bacia hidrográfica do Alto Canoas definida a partir da estação fluviométrica Rio Bonito sobre o recorte do modelo digital de elevação da área de estudo.



Fonte: produção do próprio autor.

Ainda, na Figura 7, são ilustradas as sub-bacias criadas a partir dos exutórios. Nesta, são expostos também os canais gerados pelo sistema, a partir do MDE.

Figura 7 - Divisão da bacia hidrográfica do Alto Canoas em sub-bacias e seus exutórios, bem como os canais gerados pelo modelo SWAT.



Fonte: produção do próprio autor.

Com esta primeira fase de dados incluídos de forma correta no sistema, o modelo calculou então parâmetros referentes a altitude de cada ponto da bacia, considerando a resolução espacial do MDE

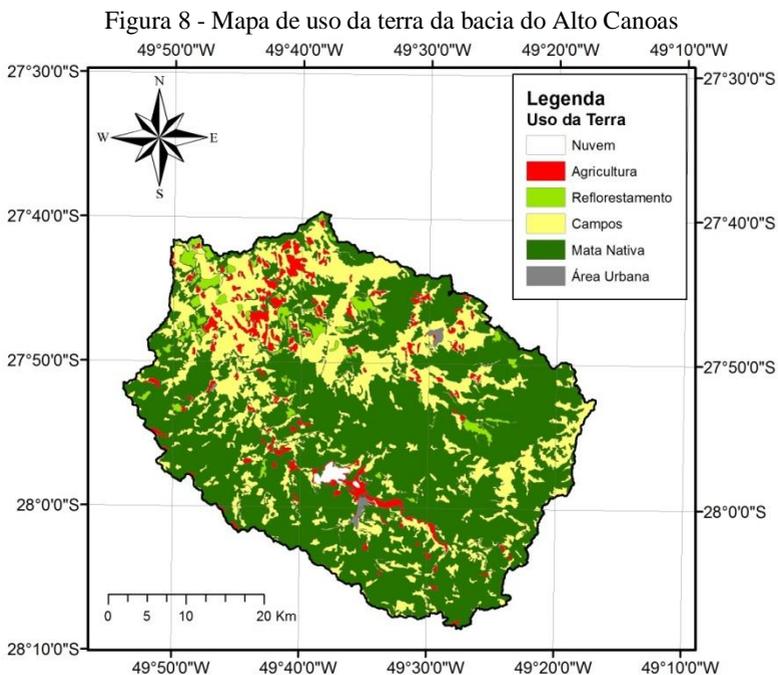
5.2.2 Uso da terra, parâmetros de solo e declividade

A etapa seguinte a definição da bacia hidrográfica se deu com a inserção dos dados espaciais referentes ao uso e ocupação do solo e as

classes de solo no seu interior, além da geração do mapa de declividade a partir do ArcSWAT.

O uso da terra na bacia hidrográfica é predominantemente mata nativa (64,49%) e campos (27,39%). Também se observam agricultura (4,54%), reflorestamento (2,85%) e área urbana (0,34%). As áreas com elevada declividade, as quais predominam na região de estudo, são basicamente cobertas por floresta nativa.

Nas regiões com declividades mais suaves, próximas a foz, observam-se de forma predominante a presença dos campos. São nestas áreas também que são encontradas as terras com finalidades econômicas (Figura 8). As cidades, correspondentes as áreas urbanas dos municípios de Bom Retiro, Rio Rufino e Urubici, foram estabelecidas em áreas de relevo predominantemente mais suave. O mapa de uso da terra foi classificado de forma supervisionada a partir de imagem digital do satélite *Landsat 5*, sensor *TM* (resolução espacial de 30 m), do ano de 2005, e está demonstrado na Figura 9.



Fonte: produção do próprio autor.

Cabe ressaltar que a classe "nuvem" se refere a nebulosidade presente na atmosfera no momento da tomada da imagem de satélite, não existindo classe correspondente no SWAT. Portanto, tal classe foi reclassificada para o uso "mata nativa", o qual detém a maior porcentagem de área sobre a bacia, além de ser o uso predominante na área correspondente em imagens de satélite de outras datas. Esta e as demais classes foram redefinidas conforme usos da terra pré-definidos no modelo. A Tabela 1 detalha estas informações.

Tabela 1 - Redefinição das classes de uso da terra conforme as pré-definidas no modelo SWAT.

Área (%)	Classe identificada originalmente	Redefinição para classe modelo SWAT
0,39	Nuvem	FRSE - <i>Forest-Evergreen</i>
4,54	Agricultura	AGRC - <i>Agricultural</i>
2,85	Reflorestamento	PINE - <i>Pine</i>
27,39	Campos	PAST - <i>Pasture</i>
64,49	Mata Nativa	FRSE - <i>Forest-Evergreen</i>
0,34	Área Urbana	URBN - <i>Residential</i>

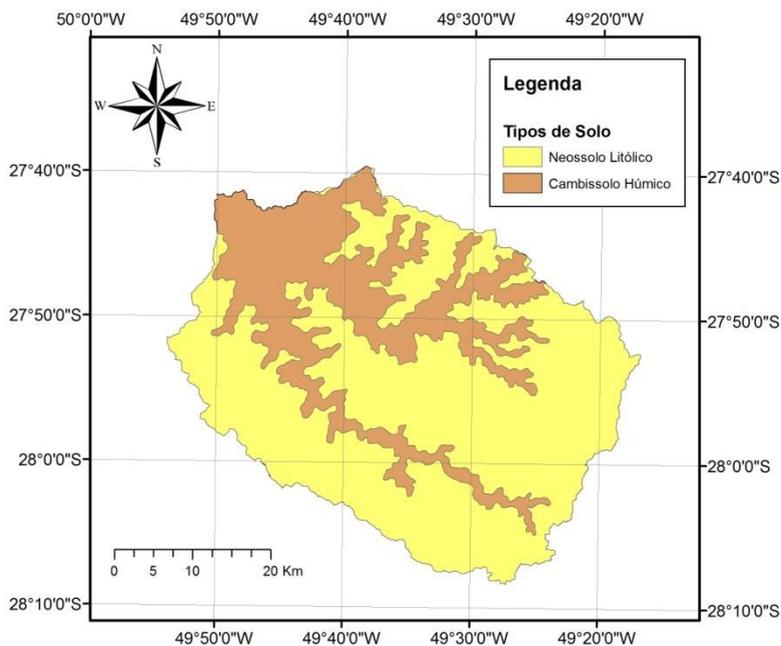
Fonte: produção do próprio autor.

Quanto aos solos da bacia hidrográfica do Alto Canoas, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA (1999) revela dois tipos: Neossolo Litólico e Cambissolo Húmico em uma escala de 1:250.000. O mapa de solos é ilustrado na Figura 9.

Para leitura correta do programa, estas informações devem ser incluídas de forma que o modelo entenda a quais classes os solos efetivamente pertencem. Para tanto, correspondências devem ser encontradas nos solos americanos (presentes no banco de dados do SWAT) em relação aos brasileiros. Caso esta relação não seja estabelecida, parâmetros físicos do solo em questão devem ser inseridos no modelo.

O Neossolo Litólico encontra correspondência na classe "Udorthents", presente no banco de dados do SWAT (FERREIRA et al., 2007; MEDEIROS et al., 2013; PRADO, 2013).

Figura 9 - Mapa de solos da bacia do Alto Canoas



FONTE: EMBRAPA (1999).

Pelo contrário, para o Cambissolo Húmico não foi encontrada nenhuma correspondência, sendo necessária a adição manual de seus parâmetros físicos no modelo. Para tanto, foi imprescindível a pesquisa na literatura de tais valores. A Tabela 2 os traz de forma detalhada.

Tabela 2 - Parâmetros referentes a classe de solo Cambissolo Húmico inseridos no modelo SWAT.

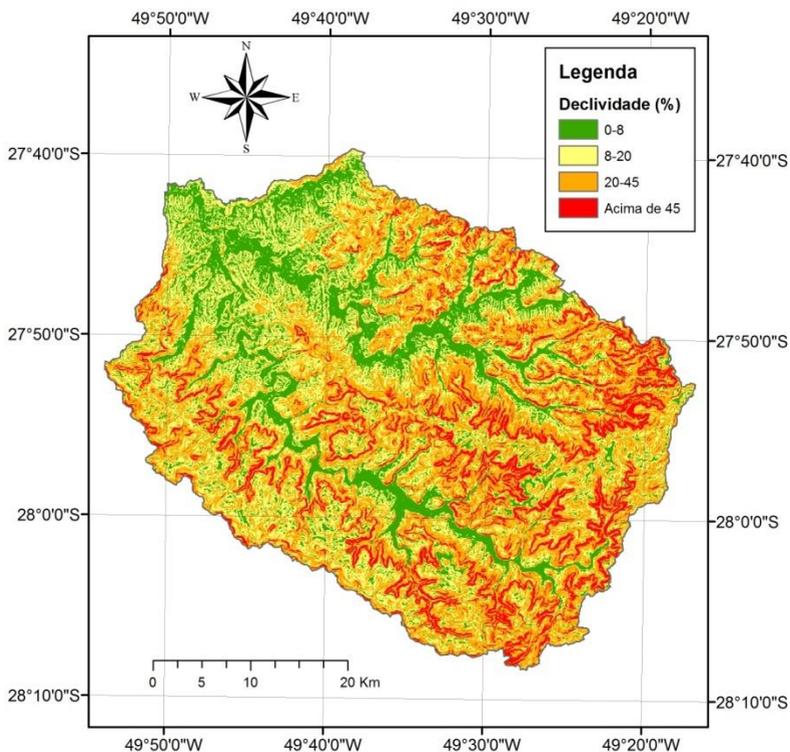
Parâmetro	Valor	Descrição
SNAM	CAMBISSOLO	Nome do solo.
HYDGRP	C (EMBRAPA, 2011)	Grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D).
SOL_ZMX	1500 (EMBRAPA, 2011)	Profundidade máxima de enraizamento (mm).
ANION_EXCL	0,6 (ABRÃO, 2011)	Fração de porosidade. Opcional.

SOL_CRK	0,5 (Padrão do modelo)	Volume de rachadura. Opcional.
TEXTURE	-	Textura do solo. Opcional.
SOL_Z (layer #)	1200 (EMBRAPA, 2011)	Profundidade do solo (mm).
SOL_BD (layer #)	1,4 (SILVA et. al., 2005)	Densidade aparente (úmida) (g cm^{-3}).
SOL_AWC (layer #)	0,05 (OTTONI, 2005)	Capacidade de água disponível da camada de solo ($\text{mmH}_2\text{O mm}^{-1}$ solo).
SOL_K (layer #)	84,3 (ABRÃO, 2011)	Condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1}).
SOL_CBN (layer #)	2,2 (SILVA et. al., 2005)	Carbono orgânico (% peso solo).
SOL_CLAY (layer #)	36,4 (SILVA et. al., 2005)	A percentagem de partículas do solo que são $< 0,002$ mm de diâmetro.
SOL_SILT (layer #)	15,8 (SILVA et. al., 2005)	Silte (% peso solo).
SOL_SAND	33,4 (SILVA et. al., 2005)	A percentagem de partículas que têm diâmetro entre 2,0 e 0,05 mm.
SOL_ROCK	14,4 (SILVA et. al., 2005)	A percentagem da amostra que tem um diâmetro de partícula > 2 milímetros.
SOL_ALB	0,2 (PEREIRA et. al., 2002)	Albedo.
USLE_K (top layer)	0,0175 (SCHICK et. al., 2002)	Fator de erodibilidade.
SOL_EC (layer #)	-	Condutividade elétrica (dS m^{-1}). Opcional.

Fonte: produção do próprio autor.

Ainda com o modelo digital de elevação, o *ArcSWAT* gerou o mapa de declividades para a bacia em estudo com a distribuição de classes conforme a classificação da EMBRAPA, sendo: 0 a 8%, relevo plano a suave ondulado; 8 - 20%, relevo ondulado; 20 a 45, relevo forte ondulado e; acima de 45%, relevo montanhoso a escarpado. O mapa de declividade gerado pelo modelo se encontra na Figura 10.

Figura 10 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do Alto Canoas gerado pelo ArcSWAT.



Fonte: produção do próprio autor.

Por fim, com a definição das classes de uso da terra, tipo de solo e declividade, o modelo gerou as HRU's em número de 289. Estas são consideradas pelo programa como unidades em que, em todo seu interior, dispõem de apenas um uso da terra, um tipo de solo e uma classe de declividade. O programa executa esta operação para que cada unidade de resposta hidrológica tenha uma Curva Número (CN) única associada. Portanto, cada *HRU* terá um tamanho e comportamento hidrológico diferente dos demais.

5.2.3 Escalas temporais e gerador de dados climáticos

A última etapa de construção do banco de dados ocorreu com os dados não espaciais. Para tanto, buscaram-se séries históricas de um período de sete anos, de 01 de janeiro de 1995 a 31 de dezembro de 2001. O estudo sobre o modelo foi realizado, primeiramente, sobre a escala diária e, posteriormente, sobre escala mensal do mesmo período. Estas séries definiram as duas escalas temporais deste estudo, quais sejam, a escala diária e a escala mensal.

No primeiro caso, o objetivo foi verificar as respostas imediatas da bacia, num período de tempo de UM dia, expressas pelas vazões diárias. No segundo, o objetivo foi analisar o comportamento hidrológico da bacia num intervalo de tempo maior, visando avaliar o uso do modelo no gerenciamento dos recursos hídricos da bacia a longo prazo.

A escala mensal consiste em médias mensais das séries diárias. Operação esta feita tanto dentro do modelo hidrológico, quanto manualmente, como na inserção das vazões para avaliação do ajuste.

5.2.3.1 Precipitação

O modelo hidrológico SWAT, visando uma melhor cobertura em função da distribuição das estações climatológicas, permite que dados de mais de uma estação sejam utilizados na modelagem. Para tanto, os atributos espaciais destas estações são inseridos no sistema visando um melhor balanço em relação a desuniformidade espacial dos fenômenos climáticos.

A princípio, foram elencadas oito estações pluviométricas dispostas no interior e no entorno da bacia hidrográfica. Todas se encontram sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e apresentaram dados para a grande maioria dos dias dentre os sete anos que foram modelados pelo SWAT. As séries históricas foram adquiridas através do portal HIDROWEB, de responsabilidade da Agência Nacional de Águas. A Tabela 3 expõe as estações pluviométricas levantadas inicialmente.

Tabela 3 - Estações pluviométricas elencadas inicialmente para composição do banco de dados de entrada do SWAT.

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Altitude
* DNAE 2849021	Urubici	Urubici	28°00' S	49°36' O	853 m
* DNAE 2749031	Vila Canoas	Bocaina do Sul	27°48' S	49°47' O	900 m
* DNAE 2749007	Lomba Alta	Alfredo Wagner	27°44' S	49°23' O	550 m
* DNAE 2749027	Anitápolis	Anitápolis	27°55' S	49°08' O	500 m
DNAE 2849023	Despraiado	Bom Jardim da Serra	28°22' S	49°48' O	1080 m
DNAE 2749002	Ituporanga	Ituporanga	27°24' S	49°36' O	370 m
* DNAE 2749035	Bocaina do Sul	Bocaina do Sul	27°45' S	49°57' O	900 m
DNAE 2750007	Painel	Lages	27°55' S	50°06' O	1196 m

Fonte: produção do próprio autor.

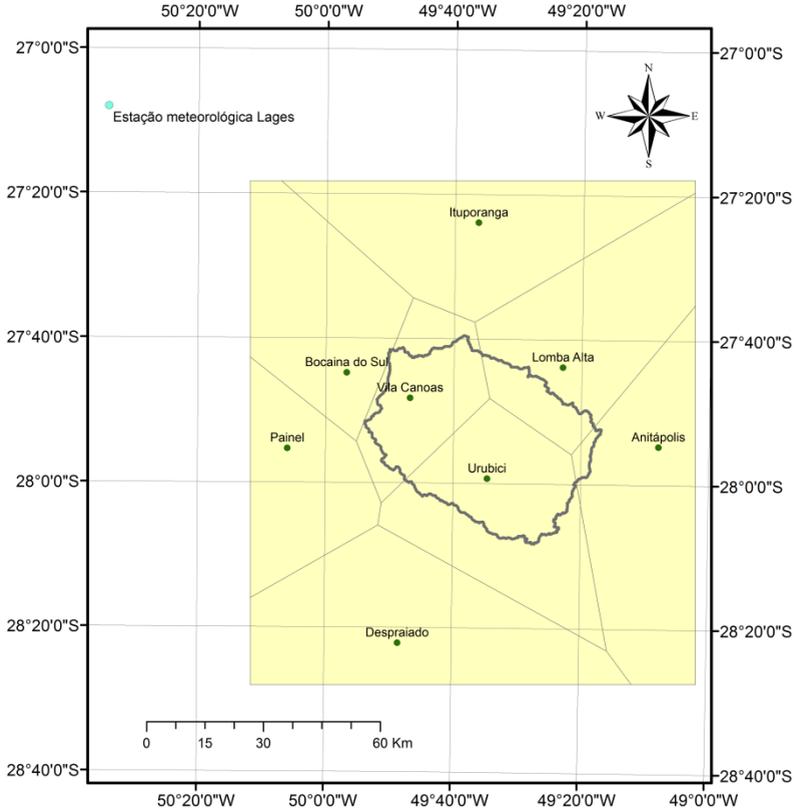
Nota: As estações sinalizadas com um asterisco (*) são as que detêm área de contribuição na bacia, através de análise pelo método dos polígonos de *Thiessen*, e tiveram utilizadas suas séries históricas.

Para verificação de quais estações pluviométricas exercem influência na área da bacia, foram gerados polígonos de *Thiessen* com o *ArcGIS* e, desta forma, constatadas quais detinham área de contribuição sobre a unidade fisiográfica. A Figura 11 ilustra esta operação.

Ao se observar, então, a distribuição dos polígonos de *Thiessen*, percebe-se que das oito estações pluviométricas elencadas inicialmente, apenas cinco possuem área de contribuição no interior da bacia hidrográfica do Rio Canoas. Na Tabela 3 estas estações estão sinalizadas com um asterisco.

Portanto, as séries históricas das estações Despraiado (DNAE 2849023), Ituporanga (DNAE 2749002) e Painel (DNAE 2750007) foram desprezadas.

Figura 11 - Método dos polígonos de *Thiessen* aplicado, estações pluviométricas e estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET de Lages.



Fonte: produção do próprio autor.

Das cinco estações pluviométricas que restaram, apenas uma (Bocaina do Sul - DNAE 2749035) não teve os dados completos dentro os sete anos de interesse. Tal falha no registro ocorreu em apenas um dia.

5.2.3.2 Demais dados climáticos

Os dados climáticos exigidos pelo modelo, temperaturas máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), radiação solar (MJ m^{-2}) e velocidade do vento (m s^{-1}), foram obtidos através dos registros de dados diários da estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET

de Lages. Esta estação, de coordenadas geográficas 27°08' de latitude sul e 50°34' de longitude oeste, encontra-se localizada fora da bacia hidrográfica do Alto Canoas. Foi escolhida em função de ser a mais próxima da área de estudo, por ser também uma estação que conta com as séries históricas climáticas necessárias aos dados de entrada no modelo e, além disso, detém os registros dos dados necessários de forma mais completa.

De todo o período compreendido, a série histórica diária de velocidade do vento apresentara falhas nos registros. Nos dados de temperaturas máximas e mínimas foram observadas falhas em apenas um dia. Quanto a radiação solar, entre os anos de 1995 a 2011 verificaram-se sete falhas. E, finalmente, a umidade relativa do ar apresentou mais falhas, a qual contou com 371 dias de ausência de dados, pois no período compreendido entre 01 de janeiro de 2000 e 31 de dezembro de 2000, em todo o mês de janeiro do ano de 2001, além de duas datas isoladas, não continham registros.

Os dados diários de vazão observada na seção de saída da bacia hidrográfica foram adquiridos a partir da estação fluviométrica Rio Bonito (DNAE 71300000), no portal HIDROWEB, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA). A medição da vazão na mencionada estação se dá através de leitura por régua e obtenção na curva chave do trecho específico do rio.

5.2.3.3 Gerador de dados climáticos

Quando se modelam dados hidrológicos nem sempre se encontram séries históricas completas, como no presente caso. Visando o contorno deste problema, o SWAT permite a utilização do gerador de dados climáticos, o qual basicamente tem duas funções:

- Simulação do comportamento hidrológico da bacia em um ano, sem a inserção, no modelo, de séries históricas de dados meteorológicos, ou seja, com o gerador de dados climáticos é possível simular os processos hidrológicos em um ano médio, sem referências temporais, como acontece quando são inseridas séries históricas; ou
- Complemento das séries históricas quando estas se encontram incompletas. Portanto, os problemas com as séries de dados mencionados no item anterior foram desta forma solucionados. O gerador de dados climáticos é capaz de complementar escala diária e mensal.

Assim, o gerador de dados climáticos nada mais é do que um estimador mensal dos dados climáticos presentes para a bacia em questão. Estas informações entram como parâmetros do modelo exercendo as funções já citadas.

Estas estimativas foram calculadas a partir da média dos meses (completos) dentre os sete anos de modelagem (1995 a 2001). A Tabela 4 expõe os significados dos parâmetros juntamente as suas unidades e Tabela 5 demonstra estes parâmetros do gerador de dados climáticos calculados.

Tabela 4 - Parâmetros do gerador de dados climáticos

Parâmetros	Significado
TMPMX	Temperatura máxima média mensal (°C)
TMPMN	Temperatura mínima média mensal (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima no mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima no mês (°C)
PCPMM	Total médio de chuva no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão para o total médio de chuva (mm)
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação
PR_W1	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia seco no mês
PR_W2	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso no mês
PCPD	Média mensal de dias com chuva
RAINHHMX	Chuva máxima mensal em 0,5 h (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ m ⁻²)
DEWPT	Umidade relativa média no mês (decimal)
WNDVA	Velocidade média diária do vento no mês (m s ⁻¹)

Fonte: Arnold et al. (2012).

Tabela 5 - Parâmetros do gerador de dados climáticos calculados com base nos dados das cinco estações pluviométricas com área de influência na bacia hidrográfica do Alto Canoas e na estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET de Lages.

Parâmetros	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	26,6	26,0	24,8	22,3	18,7	17,0	17,3	19,8	19,1	20,7	23,8	26,1
TMPMN	17,0	17,0	15,6	12,7	8,7	7,4	7,3	8,7	10,2	12,3	14,0	15,3
TMPSTDMX	2,8	2,7	2,8	3,4	3,5	4,0	4,3	5,2	4,5	3,7	3,3	3,3
TMPSTDMN	1,9	2,2	2,6	4,1	3,7	4,4	4,3	3,9	3,4	3,0	2,6	2,7
PCPM	208,2	188,6	107,1	98,7	76,2	111,7	140,1	105,4	180,4	173,6	112,7	150,7
PCPSTD	9,5	9,7	6,6	9,7	8,2	9,4	9,5	7,8	12,1	13,7	7,8	8,4
PCPSKW	2,5	2,5	3,5	5,4	6,1	3,4	2,8	3,0	2,9	6,0	3,4	2,2
PR_W1	0,8	0,5	0,5	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5
PR_W2	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
PCPD	26,6	22,0	21,7	14,0	12,6	14,1	15,1	13,4	18,1	21,1	21,3	20,7
RAINHMX	22,9	19,1	17,6	32,2	29,1	19,5	18,6	17,3	25,2	50,0	18,6	15,8
SOLARAV	20,3	18,4	17,1	14,4	11,7	9,9	10,8	13,2	14,1	16,6	21,2	22,5
DEWPT	0,77	0,78	0,76	0,77	0,77	0,79	0,79	0,75	0,77	0,77	0,73	0,71
WNDV	1,8	1,5	1,2	1,5	1,2	1,3	1,4	1,4	1,7	1,8	1,8	1,6

Fonte: produção do próprio autor.

Os parâmetros do gerador de dados climáticos relacionados a precipitação, foram calculados com base em uma média ponderada em função da área de influência de cada estação na bacia hidrográfica, calculada através do método dos polígonos de *Thiessen*, conforme já exposto. O programa pcpSTAT, estruturado pelos mesmos desenvolvedores do modelo SWAT apenas para este propósito, auxiliou na obtenção destes parâmetros a partir das médias diárias ponderadas.

As demais séries históricas, provenientes apenas da estação meteorológica de Lages, tiveram seus dados na íntegra submetidos ao cálculo das estimativas.

Com todos os dados mencionados até aqui adicionados de forma correta, o SWAT reescreveu as tabelas de entrada com as informações acrescidas pelo usuário e o modelo ficou disponível para ser rodado. Com isso, a simulação com valores diários e mensais referentes aos principais processos hidrológicos foram gerados pelo modelo em função das condições impostas a ele para os sete anos de séries históricas (1995 a 2001).

5.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A calibração é o processo que objetiva encontrar um conjunto de valores para os parâmetros do modelo, de modo que ele passe a representar o sistema hidrológico da bacia da melhor forma possível. Os

procedimentos podem ser classificados como automáticos ou semi-automáticos. A calibração automática é o processo de definição dos valores dos parâmetros do modelo utilizando algoritmo de busca automática, sem interferência do usuário. Este processo costuma ser utilizado com o objetivo de se obter um conjunto inicial de valores dos parâmetros. Contudo, normalmente não é aceito como resultado final, pois comumente apresentam baixa eficiência, ou seja, as vazões simuladas apresentam baixa aderência às vazões observadas no exutório. Por esta razão, o método mais empregado tem sido a calibração semi-automática, pela qual o usuário interfere no processo, estabelecendo valores ou faixas de variações que direcionam o algoritmo de calibração.

Na calibração manual os parâmetros já alterados através da calibração semi-automática passam por uma sintonia fina, buscando-se ainda uma melhor performance do modelo hidrológico. Este conjunto final de modificações é baseado em experiências através da intuição do comportamento da bacia hidrográfica e são testados através de tentativas.

A calibração semi-automática, bem como a posterior validação, foi realizada no aplicativo SWAT-CUP, versão 5.1.6.2, desenvolvido no ano de 2013 por Abbaspour e Srinivasan.

Para a calibração semi-automática no SWAT-CUP, foi utilizado o método *Sufi2* dentre os outros quatro disponíveis (*Glue*, *ParaSol*, *McMc* e *PSO*) em função das vantagens inerentes ao presente caso já expostas no item 2.4.3 do trabalho.

Para ambos os espaços de tempo, os sete anos calibrados automaticamente com o ArcSWAT, foram divididos conforme segue. O ano todo de 1995 funcionou como período de aquecimento do modelo (*warm up*), ou seja, não entrou na calibração. Autores geralmente recomendam um tempo de um a três anos para o *warm up period*. O período de aquecimento do modelo funciona para que desde o primeiro dia da calibração semi-automática e manual a simulação da vazão na seção de saída da unidade fisiográfica em estudo já esteja regularizada conforme o modelo.

Os anos de 1996 e 1997 foram o período de calibração semi-automática e manual do modelo hidrológico, ou seja, neste período os parâmetros foram alterados visando aproximar a vazão simulada da vazão observada na seção de saída da bacia hidrográfica. Por fim, utilizaram-se o período de 1998 a 2001 para validação, em que se avaliou se os parâmetros ajustados na calibração simulavam de forma satisfatória a vazão nos períodos não utilizados na calibração.

Para calibração e validação do modelo SWAT, utilizou-se a metodologia aplicada por SÁ (2014) na mesma bacia, ou seja, a série de dados diários do período de 6 anos foi subdividida em dois sub-períodos. O primeiro sub-período foi utilizado para o ajuste ou calibração do modelo e o segundo para a verificação da qualidade da calibração com objetivo de validar os resultados. SÁ (2014) utilizou os períodos de 01 de Janeiro de 1996 a 31 de Dezembro de 1997 para a calibração e de 01 de Janeiro de 1998 a 31 de Dezembro de 1999 para a validação do modelo TOPMODEL. No presente estudo, com o modelo SWAT, utilizou-se dos períodos de 01 de Janeiro de 1996 a 31 de Dezembro de 1997 para a calibração e 01 de Janeiro de 1998 a 31 de Dezembro de 2001 para a validação. Portanto, o período de calibração utilizado com o SWAT foi o mesmo aplicado no estudo do modelo TOPMODEL por SÁ (2014), totalizando dois anos de dados. Contudo, para o período de validação foram utilizados quatro anos com o objetivo de se avaliar a representatividade do modelo em um período duas vezes maior que o de calibração.

A escolha dos parâmetros a serem alterados no processo de calibração semi-automática levou em consideração ampla pesquisa na literatura, a respeito dos parâmetros que se destacaram na modelagem de outras bacias hidrográficas, a Análise de Sensibilidade dos parâmetros através do SWAT-CUP e a intuição baseada no conhecimento. Com a seleção dos parâmetros concluída, atribuiu-se então um intervalo no qual o valor do parâmetro pudesse variar.

No SWAT-CUP a busca pelo conjunto de valores dos parâmetros ocorre através de processos iterativos. Foram realizadas aproximadamente 240 iterações, com uma média de 50 simulações em cada. Uma iteração pode ser interpretada como uma tentativa de obter um conjunto de parâmetros que seja representativo dos processos físicos da bacia. A cada iteração o sistema obtém um conjunto melhor que o anterior. Uma iteração ocorre sobre um número pré-definido de simulações através de programação prévia no SWAT-CUP antes da rodagem da calibração semi-automática, nas quais o valor de cada um dos parâmetros selecionados irá variar no intervalo estabelecido.

Ao final de cada iteração, o programa apresenta o conjunto de valores dos parâmetros das simulações realizadas e aponta a melhor. Uma nova iteração pode ser gerada a critério do usuário, alterando-se a amplitude da variação dos valores dos parâmetros, com o objetivo de que as simulações possam ser melhoradas. Tal operação se repete até o

momento em que se entenda que a parametrização está satisfatória e/ou que, com os parâmetros adotados, a calibração não terá mais progressos.

A alteração dos parâmetros pode acontecer de três formas:

- Substituição do valor atribuído originalmente através da calibração automática pelo valor do parâmetro resultante da iteração semi-automática;
- Adição da quantia obtida na iteração no valor preexistente do parâmetro, atribuído originalmente através da calibração automática, e/ou;
- Multiplicação do valor original, atribuído originalmente através da calibração automática, por $1 +$ o valor atribuído na iteração, ou seja, alteração do valor do parâmetro em porcentagem.

O critério de escolha do método de parametrização ocorreu como se segue: caso o parâmetro físico fosse único para toda a bacia, foi utilizada a substituição do valor, pelo contrário, se o parâmetro físico obedecesse a uma variabilidade espacial (ou temporal, como no caso das séries de precipitação), utilizou-se a multiplicação. A Tabela 6 demonstra o significado físico dos parâmetros calibrados semi-automatadamente e manualmente.

Tal critério foi utilizado visando justamente não perder a variabilidade espacial dos parâmetros dessa natureza. Marcon (2013), também optou por trabalhar desta forma.

O parâmetro `CH_L2.rte` não respondeu ao método de multiplicação, portanto, apesar de variar espacialmente conforme cada sub-bacia, utilizou-se a substituição do valor previamente atribuído pela calibração automática do SWAT.

Tabela 6 - Significado físico dos parâmetros¹ utilizados.

Parâmetro	Significado físico
GW_REVAP.gw	Parâmetro controlador da quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes (adimensional).
ESCO.hru	Coefficiente de compensação de evaporação no solo (adimensional).
CH_N2.rte	Coefficiente de rugosidade do canal principal ($m^{-1/3} s$).
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica na base do canal principal ($mm h^{-1}$).
ALPHA_BNK.rte	Fator de fluxo de armazenamento (dias).
SOL_AWC.sol	Capacidade de água disponível da camada de solo ($mmH_2O mm^{-1} solo$).
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada ($mm h^{-1}$).
SOL_BD.sol	Densidade aparente (úmida) ($g.cm^{-3}$).
SFTMP.bsn	Temperatura para ocorrer a precipitação de neve ($^{\circ}C$).
Precipitation.pcp	Dados diários de precipitação (mm).
CN2.mgt	Curva número (adimensional).
CH_L2.rte	Comprimento do canal principal (km).
SURLAG.bsn	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (adimensional).
ALPHA_BF.gw	Fator do fluxo de base (dia).

Fonte: *User Manual SWAT-CUP 2012*.

5.4 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os desempenhos das calibrações do modelo, bem como suas validações, tanto para escala diária quanto para escala mensal, foram avaliados com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e no coeficiente de determinação (R^2).

¹ *Precipitation* é considerado como parâmetro físico apenas para sua calibração semi-automática, no entanto, é classificado como um dado de entrada do modelo.

O NSE é o método mais utilizado para a verificação da eficiência de modelos hidrológicos. Este coeficiente atribui maior peso às vazões máximas em sua avaliação. Varia de menos infinito até o seu valor máximo, que é 1, o qual representa a eficiência máxima (NASH & SUTCLIFFE, 1970), ou seja, nesse caso, o modelo simula um comportamento na seção de saída da bacia hidrográfica igual as vazões observadas. O NSE é calculado pela equação (18).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{méd_{obs}})^2} \quad (18)$$

O coeficiente R^2 tem amplitude entre 0 e 1. Quanto maior o seu valor, mais o modelo consegue explicar e se ajustar aos valores observados. É obtido através da expressão (19).

$$R^2 = \frac{[\sum(Q_{obs} - Q_{méd_{obs}}) \cdot (Q_{sim} - Q_{méd_{sim}})]^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{méd_{obs}})^2 \cdot \sum(Q_{sim} - Q_{méd_{sim}})^2} \quad (19)$$

Onde, Q_{obs} : vazão observada; $Q_{méd_{obs}}$: média da vazão observada no período; Q_{sim} : vazão simulada pelo modelo; $Q_{méd_{sim}}$: média da vazão simulada no período.

5.5 SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS BÁSICOS OBSERVADOS E SIMULADOS PELO MODELO SWAT

A separação da vazão básica da vazão total observada e simulada ocorreu através do Filtro de Chapman.

Para a aplicação deste filtro é necessário o cálculo do coeficiente de recessão (k). O k é calculado durante longos períodos de recessão, objetivando que o valor calculado seja mais representativo para a região estudada. Sua unidade de tempo é a mesma da série histórica. No presente trabalho, foram geradas as vazões básicas para a escala diária. É obtido através da expressão (20).

$$k = \left| \frac{\Delta t}{\ln(Q_t/Q_{t0})} \right| \quad (20)$$

Onde, Δt : intervalo de tempo entre as leituras de vazão; Q_t : leitura de vazão no início do período de recessão; Q_{t0} : leitura de vazão no final do período de recessão.

A partir da constante de recessão se calcula o parâmetro a do Filtro de Chapman. Este parâmetro irá compor o algoritmo da equação empírica. Sua expressão está descrita em (21).

$$a = e^{-\Delta t/k} \quad (21)$$

Por fim, na expressão (22) se ilustra a equação empírica do Filtro de Chapman.

$$Q_{Bi} = \frac{a}{2-a} \cdot Q_{Bi-1} + \frac{1-a}{2-a} \cdot Q_i \quad (22)$$

Onde, Q_{Bi} : vazão oriunda do escoamento básico no dia presente; Q_{Bi-1} : vazão oriunda do escoamento básico no dia anterior; Q_i : vazão do canal no dia presente.

No cômputo da série da vazão básica o algoritmo analisa se a vazão básica calculada é maior que a vazão total. Nesse caso, o valor que entra para a série é a da vazão total, pois, necessariamente, a vazão básica não pode ser superior à vazão total.

A série de escoamento básico foi gerada através da escala diária de dados observados e simulados. Foram analisados durante o período de calibração (1996-1997) e validação do modelo (1998-2001).

Para um melhor desempenho do filtro, como procedido para a modelagem, o ano de 1995 foi utilizado como período de aquecimento do Filtro Numérico de Chapman. Desta forma, já no início do ano de 1996 a vazão básica refletiu os valores já acondicionados para a situação.

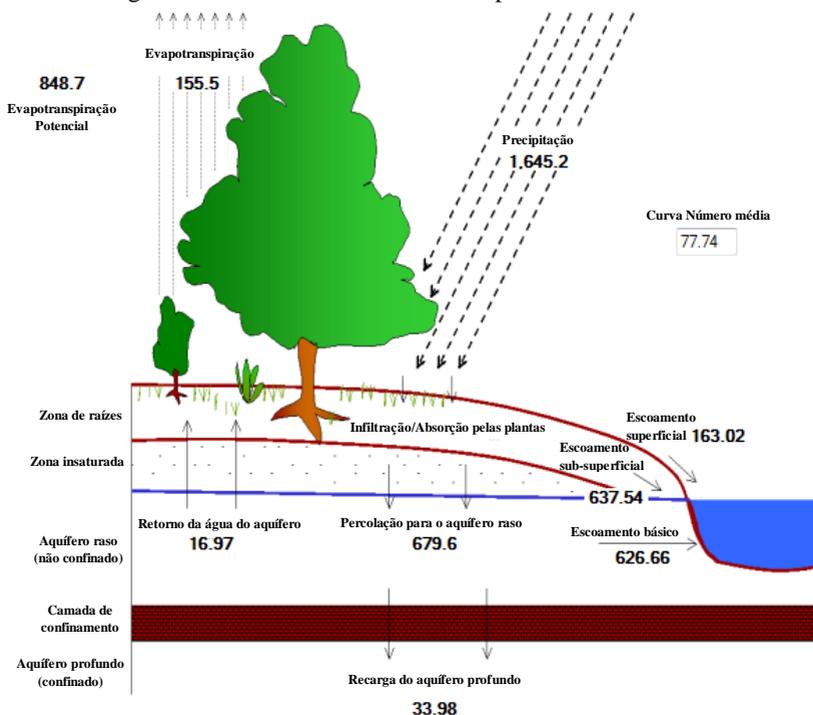
A avaliação do ajuste das vazões básicas, da mesma forma que para a vazão total, foi através dos coeficientes NSE e R^2 , expostos na seção anterior.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 BALANÇO HÍDRICO ANUAL

Um dos *outputs* do ArcSWAT 2012 é o balanço hídrico médio anual. No presente estudo, o balanço médio foi produzido a partir dos dados da série de sete anos utilizada como entrada no modelo, representada esquematicamente na Figura 12.

Figura 12 - Representação esquemática do balanço hídrico médio anual da bacia hidrográfica do Alto Canoas referente ao período de 1995 a 2001.



Fonte: Produção do próprio autor (ArcSWAT).

Nota: todas as unidades dos valores apresentados se encontram em milímetros.

A precipitação anual média de 1.645,2 mm, calculada pelo modelo, ficou bastante próxima ao valor médio citado por Santa Catarina (2006) de 1650 mm para a Região Hidrográfica 4, a qual engloba a bacia hidrográfica do Alto Canoas. Este dado sugere que o

período utilizado como série histórica e as cinco estações pluviométricas escolhidas, tanto dentro quanto no entorno da bacia, foram representativas para o estudo.

A baixa fração de água do balanço hídrico relacionada com a evapotranspiração está de acordo com o esperado para esta bacia, dadas as suas características de altitude e baixas temperaturas. Da precipitação anual média, o ArcSWAT estimou que 9,45% (155,5 mm) são convertidos em evapotranspiração e 86,75% (1427,2 mm) em escoamentos. Destes, 11,42% é composto de escoamento superficial (*surface runoff*), 44,67% se referem ao escoamento sub-superficial (*lateral flow*) e os 43,91% restantes se tratam do escoamento básico (*return flows*).

Nota-se que, apesar do valor da Curva Número (CN) médio ser relativamente alto (77,74), o escoamento superficial é pouco expressivo em relação ao total precipitado (9,9%). De acordo com a Tabela 7, este valor equivaleria a áreas urbanas em solos arenosos, campos e plantações em solos com média infiltração ou ainda florestas em solos com baixa capacidade de infiltração.

Tabela 7 - Valores de CN para diferentes coberturas de solo em quatro grupos hidrológicos.

Condição	A	B	C	D
Florestas	41	63	74	80
Campos	65	75	83	85
Plantações	62	74	82	87
Zonas comerciais	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais	77	85	90	92

Fonte: Tucci et. al. (1993).

Por outro lado, de acordo com o modelo, o fluxo sub-superficial lateral provém de 38% do total precipitado. Juntos, escoamento superficial e fluxo sub-superficial, respondem por 48% do volume precipitado que se converte em escoamento. Portanto, a água tende a infiltrar-se e escoar sub-superficialmente, o que possivelmente ocorre nas vertentes íngremes formadas por solos litólicos cobertos por floresta

nativa. Além destes dois fatores, a CN alta pode estar sendo influenciada pela boa distribuição temporal das chuvas na bacia no período estudado, o que contribuiria para a manutenção da umidade antecedente. De fato, o volume significativo de escoamento básico também serve como indicador de que a umidade do solo se mantém nos períodos sem chuva.

De acordo com o modelo, cerca de 92% do volume total percolado (679,6 mm) se converte em escoamento básico, fazendo com que este escoamento tenha praticamente o mesmo peso que o escoamento lateral (626,66 mm) na formação da vazão no canal principal. Por outro lado, apenas 5% do volume percolado se destinam à percolação profunda e seriam capazes de abastecer o Aquífero Guarani, uma vez que esta bacia está localizada numa importante área de recarga do mesmo. Pode-se afirmar, portanto, que em média, a cada 20 anos acumulam-se volumes de percolação profunda capazes de abastecer tal aquífero equivalentes ao volume médio anual percolado para o aquífero raso.

Quanto ao Plano da Bacia com vistas à gestão dos recursos hídricos, destaca-se a importância da preservação das áreas de florestas localizadas nas vertentes íngremes, uma vez que o balanço hídrico indica um papel importante das mesmas no favorecimento da infiltração e, especialmente, do escoamento sub-superficial.

O balanço hídrico também aponta para a relevância do escoamento de base na manutenção das vazões nos canais da bacia, o que está relacionado com o armazenamento de água no solo nas camadas mais profundas, o que pode estar ocorrendo especialmente nas regiões de Cambissolo.

Devido às características pluviométricas da região, modificações impactantes no uso da terra, que possam desfavorecer a infiltração de água no solo, devem ser tratadas com rigoroso critério pelo plano da bacia. O escoamento superficial pode ser aumentado, implicando na ocorrência de enxurradas, erosão, inundações e deterioração da qualidade da água pelo transporte de sedimentos e poluentes agrícolas.

6.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT

6.2.1 Calibração e validação do modelo na escala diária

O objetivo em calibrar o modelo na escala diária foi verificar as respostas imediatas da bacia, num período de tempo de 1 dia, expressas pelas vazões diárias. A Tabela 8 apresenta os conjuntos de valores dos parâmetros do modelo obtidos na calibração automática e semi-automática, bem como os métodos utilizados na parametrização. Na coluna Automático encontram-se os valores iniciais fornecidos pelo algoritmo de busca na calibração automática e, na coluna Semi-automático, o conjunto obtido após a interferência do usuário.

Quanto ao desempenho do modelo, a calibração automática, que forneceu o primeiro conjunto de valores dos parâmetros, apresentou resultado nada satisfatório, pois seu Nash-Sutcliffe (NSE) ficou em -3,13 com R^2 de 0,05. A Figura 15 apresenta os hidrogramas observado e simulado com os valores calibrados.

Após a interferência do usuário, alterando manualmente os parâmetros, obteve-se uma melhora significativa com um NSE de 0,72 e R^2 de 0,77. Na Figura 16 encontram-se os hidrogramas observado e calibrado com os novos valores. Valores das funções-objetivo NSE e R^2 maiores que 0,4 e 0,5, respectivamente, indicam desempenho satisfatório de um modelo (GREEN & VAN GRIENSVEN, 2008). Para ser considerado um bom ajuste, Krysanova et al. (1998) afirma que são necessários valores de NSE superiores a 0,7.

Tabela 8 - Parâmetros de calibração do modelo SWAT na modelagem hidrológica da bacia do Alto Canoas na escala diária².

n°	Parâmetro do Modelo	Método de Parametrização	Automático	Semi-automático
1	GW_REVAP.gw	Substituição	0,020000	0,179880
2	ESCO.hru	Substituição	0,950000	0,931943
3	CH_N2.rte	Substituição	0,014000	0,066830
4	CH_K2.rte	Substituição	0,000000	123,944702
5	ALPHA_BNK.rte	Substituição	0,000000	0,470856
6	SOL_AWC.sol	Cambissolo	0,050000	0,178883
		Neossolo	0,000000	-
		Litólico		
7	SOL_K.sol	Cambissolo	84,300000	1,003626
		Neossolo	240,000000	1,003626
		Litólico		
8	SOL_BD.sol	Cambissolo	1,400000	0,770128
		Neossolo	0,000000	-
		Litólico		
9	SFTMP.bsn	Substituição	0,500000	-10,106767
10	Precipitation.pcp	Multiplicação	*1	-0,187090
11	CN2.mgt	Multiplicação	*2	0,041875
12	CH_L2.rte	Substituição	*3	15,015324
13	SURLAG.bsn	Substituição	4,000000	3,370602
14	ALPHA_BF.gw	Substituição	0,048000	0,499775

Fonte: produção do próprio autor.

Os parâmetros 6, 7, 8, 10, 11 e 12 apresentados na Tabela 8 variam temporal ou espacialmente. Os valores indicados na coluna Semi-automático significam o grau de variação geral destes parâmetros quando comparados em conjunto com os valores obtidos na calibração automática, exceto o parâmetro 12 (CH_L2.rte) o qual teve sua melhor resposta sendo substituído e adotado um só valor para todas as sub-bacias.

²*1 : série histórica;

*2 : valor do parâmetro físico conforme o uso do solo, classe de solo e classe de declividade (HRU);

*3 : valor do parâmetro físico conforme sub-bacia.

Da Tabela 8, fazem-se as seguintes observações:

1. $GW_REVAP.gw = 0,1799$: há pouco movimento da água da zona do aquífero para a zona de raízes em relação a evapotranspiração potencial. Entretanto este parâmetro costuma situar seus valores entre 0,02 e 0,20. Se este valor se aproximasse de 1 (um) a taxa de transferência de água seria proporcionalmente mais próxima da evapotranspiração potencial. Esperam-se movimentos maiores nas regiões de Cambissolo, próximo ao canal principal onde o relevo se apresenta com baixas declividades e agricultura. O valor 0,1799 pode estar associado ao fato de haver ocorrência de áreas declivosas, com solos rasos e a rocha logo abaixo, típico dos Neossolos litólicos.
2. $ESCO.hru = 0,9319$: está próximo de 1. Quanto mais próximo de zero, significa que o sistema é capaz de extrair com mais facilidade a umidade do solo em profundidades maiores. Portanto, para a presente bacia, a compensação de evaporação no solo é baixa, o que pode estar associado ao predomínio de solos argilosos na bacia, os quais retêm a água em seus meso e microporos.
3. $CH_N2.rte = 0,0668 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$: quanto maior o coeficiente, maior a rugosidade do canal, com maior perda de carga e diminuição da vazão. Arnold et. al. (2012) indicam que nos casos do canal principal da bacia do Alto Canoas, o coeficiente pode se situar entre 0,05 e 0,15. O valor encontrado de 0,0668 indica conformidade com o esperado para aquela região.
4. $CH_K2.rte = 123,44 \text{ mm h}^{-1}$: esta taxa de condutividade hidráulica pode ser considerada alta. No entanto, este valor se refere à condutividade do solo que compõe o leito do canal e não o solo da bacia. Há coerência neste valor, considerando que o curso d'água principal escoar na maior parte do trajeto em vales, em altitudes abaixo de 950 m, cuja classe de solo predominante é o Cambissolo.
5. $ALPHA_BNK.rte = 0,4709$ dias: o fator de fluxo de armazenamento apresentou um valor intermediário, pois valores próximos a um dia indicam que a bacia produz uma curva de recessão de vazão gradualmente achatada, ou seja, uma maior contribuição do solo para a manutenção da vazão no canal principal. Por outro lado, quanto mais este valor se aproximar

de zero a bacia será mais dependente da água da chuva para a manutenção da vazão, pois a curva de recessão é mais íngreme. Ao se observar os valores de escoamentos estimados pelo modelo, verifica-se que o mesmo atribui 43,91% do total dos escoamentos ao escoamento de base, atribuindo um peso intermediário da vazão total à vazão básica. Este valor concorda com as observações feitas na seção sobre o balanço hídrico médio anual.

6. SOL_AWC.sol = $\uparrow 17,89\%$ - o Cambissolo é capaz de armazenar cerca de 6% ($0,05 \text{ mmH}_2\text{O mm}^{-1}\text{solo} + 17,89\%$) de seu volume em água. O valor final para o parâmetro ficou ainda bem próximo do valor encontrado na literatura, o qual foi acoplado ao banco de dados do SWAT (Tabela 2). Segundo o modelo, o Neossolo litólico não possui fração de água disponível no solo. Esta evidência junto a resposta dos demais parâmetros indica que em termos gerais os solos na bacia possuem uma boa capacidade de drenagem, porém, baixa eficiência no armazenamento de água em seus perfis.
7. SOL_K.sol: $\uparrow 100,36\%$ - os valores de condutividade hidráulica saturada sofreram um acréscimo de 100,36 % em relação ao encontrado na literatura (para o Cambissolo) e o presente no banco de dados do SWAT (para o Neossolo litólico). Portanto, seus valores finais podem ser considerados bem elevados. No entanto, fazem sentido quando se observa que os fluxos sub-superficial e básico são altos e o escoamento superficial é baixo. Dessa forma, pode-se concluir que, de um modo geral, os solos da bacia possuem uma boa capacidade de drenagem, o que pode estar associado à cobertura florestal.
8. SOL_BD.sol = $\uparrow 77,01\%$ - a classe Cambissolo sofreu um aumento de 77,01% com a calibração semi-automática em relação ao encontrado na literatura. Dessa forma, o valor deste parâmetro é considerado bem alto, o que indicaria estado compactado para o solo da bacia. Aparentemente este valor não detém um significado físico, pois os demais parâmetros analisados acima, bem como a análise do balanço hídrico médio, apontam que a bacia possui uma boa capacidade de drenagem, o que não seria esperado se o solo estivesse compactado. Além disso, há que se considerar o predomínio de florestas e campo nativo, em que a densidade aparente do solo deve estar em seu estado natural. De qualquer forma, apesar de

não ter um sentido físico, foi atribuído o valor objetivando obter o melhor ajuste do modelo.

9. SFTMP.bsn = -10,11 °C: através da calibração semi-automática se encontrou um valor mais baixo de temperatura para ocorrência de neve em relação ao estabelecido pela calibração automática. É sabido que nas regiões mais altas da bacia existe a possibilidade de precipitação na forma de neve a partir de temperaturas inferiores a -4 °C.
10. Precipitation.pcp = ↓ 18,71% - redução de 18,71% em todos os dias da série histórica de precipitação. Esta variação de -18,71% em relação à parametrização automática pode indicar que as chuvas ocorrem em um padrão espacial diferente do estimado pelo modelo inicialmente, ou ainda, que seriam necessárias mais estações pluviométricas para representar o volume precipitado, apesar da precipitação média observada na série histórica praticamente coincidir com a média conhecida para aquela região, segundo observado em Santa Catarina (2006). Esta alteração pode indicar também que o modelo pode subestimar as perdas de água por percolação profunda ou para a atmosfera através da evapotranspiração.
11. CN2.mgt = ↑ 4,19% como já citado, o valor de CN varia conforme o uso da terra e classe de solo. No presente ajuste, os valores individuais deste parâmetro para cada sub-bacia, variaram muito pouco em relação ao estabelecido pela calibração automática. No entanto, ainda assim, foram acrescidos, no geral, em 4,19% indicando que a participação do escoamento superficial é maior do que inicialmente o modelo previa. Este aumento também pode ter ocorrido para ponderar o efeito das parcelas de relevo mais declivoso presentes bacia, nas quais a taxa de infiltração de água no solo é menor.
12. CH_L2.rte = 15,02 km: este foi o valor de comprimento do canal principal de cada sub-bacia que mais contribuiu ao ajuste. Apesar de cada uma destas subunidades possuir tamanhos diferentes, elas detêm suas áreas superficiais próximas a um tamanho médio, respondendo melhor desta forma e não tendo sua alteração em porcentagem, como a princípio seria o mais adequado.
13. SURLAG.bsn = 3,37: o parâmetro SURLAG controla a fração do total de água disponível no escoamento superficial que poderá entrar no curso d'água em um dia. Varia de 1 a 12 e

quanto mais baixo, maior o tempo de concentração (T_c) e menos água chega aos canais. Portanto, o valor de 3,37 reflete a extensão da bacia hidrográfica do Alto Canoas e seu consequente grande tempo de concentração.

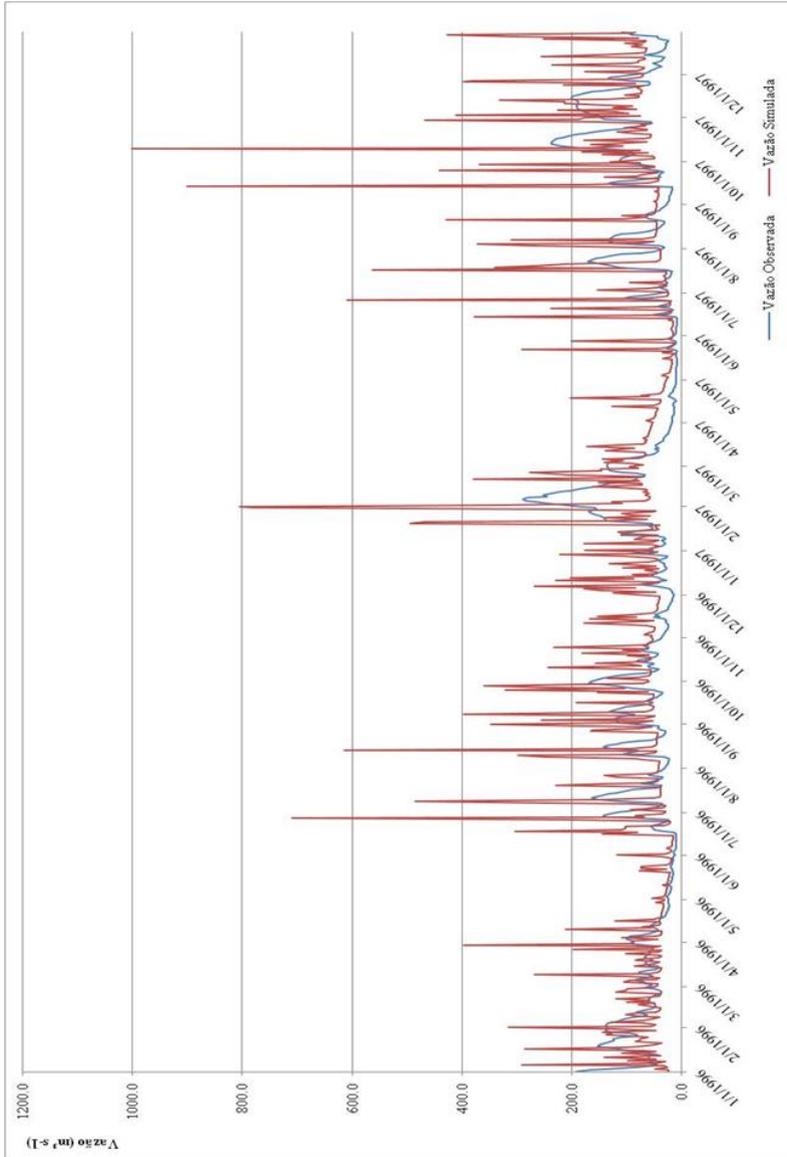
14. ALPHA_BF.gw = 0,4998 dias: o fator de fluxo de base é um índice direto da resposta do fluxo de água no solo a mudanças na recarga, ou seja, avalia de forma direta a resposta da vazão subterrânea em função da recarga, tendo relação direta com as recessões do hidrograma. Varia de 0 a 1 no modelo. Quanto mais baixo o valor, menor a resposta da bacia a recarga, isto é, a recarga será mais lenta. Através da calibração semi-automática, o valor que melhor se ajustou para o parâmetro foi intermediário, assim como se observou no parâmetro ALPHA_BNK, de significado físico parecido ao do presente parâmetro. Isso confirma o comportamento da bacia no qual a contribuição do escoamento de base é significativa, porém não alta para a vazão total.

Os parâmetros calibrados foram aplicado no período de 1998 a 2001 com o objetivo de validá-los. Neste período, obteve-se um NSE de 0,76 e R^2 de 0,79, ou seja, no período de validação o modelo mostrou-se mais representativo do sistema que no período de calibração. Os hidrogramas observado e simulado estão expostos na Figura 15.

Lubitz (2009) alcançou um NSE de 0,32 utilizando dados diários na bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia (área de 30,74 km²), em Lontras, Santa Catarina, em um período de três anos, após a calibração manual. Marcon (2013) obteve resultado semelhante (NSE = 0,37) na bacia hidrográfica Rincão do Soturno (área de 11,98 km²) na região de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, com um período de validação um ano e meio.

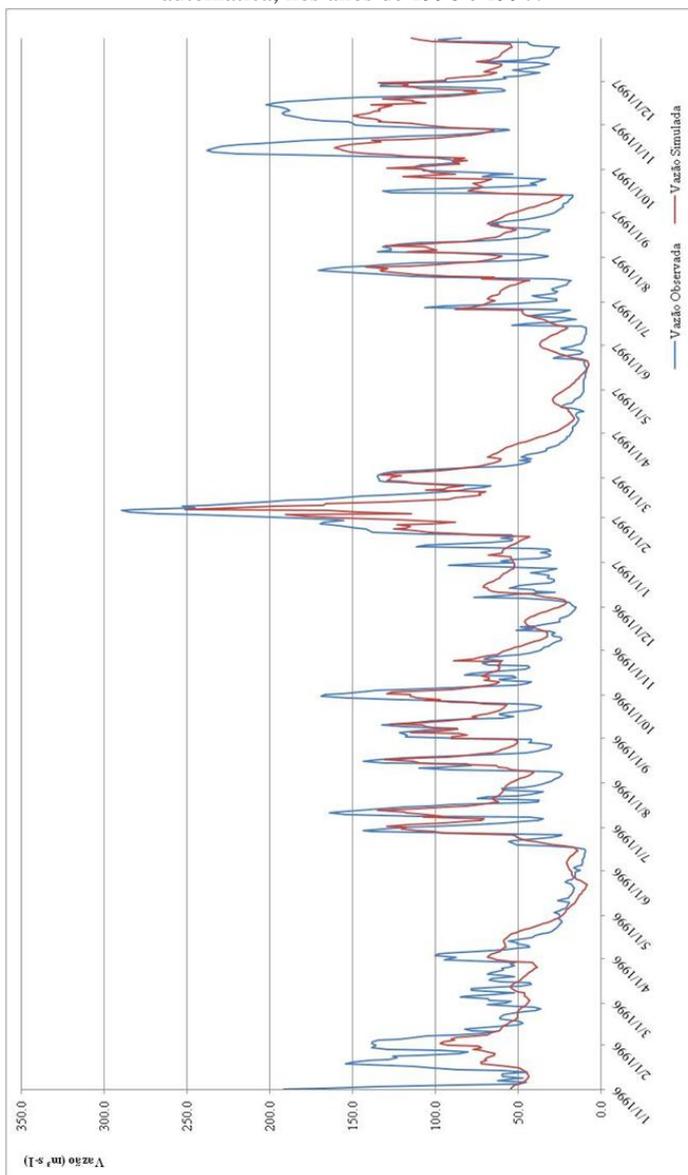
Os autores acima citados trabalharam com bacias hidrográficas bem menores que a bacia do Alto Canoas, fato este que pode explicar o baixo desempenho do modelo ajustado para escala diária, se comparados ao presente trabalho. Bacias menores tendem a dar respostas mais imediatas aos estímulos hidrológicos, podendo apresentar grandes variações entre entradas e saídas, o que pode dificultar encontrar um conjunto adequado de parâmetros capazes de representar tais variações. Também, originalmente o modelo SWAT foi desenvolvido para modelar sistemas hidrológicos baseados em valores médios e aplicados a grandes bacias.

Figura 13 - Hidrogramas diários observado e simulado com calibração automática, nos anos de 1996 e 1997.



Fonte: produção do próprio autor (SWAT-CUP).
Nota: data em formato americano: mm/dd/aaaa.

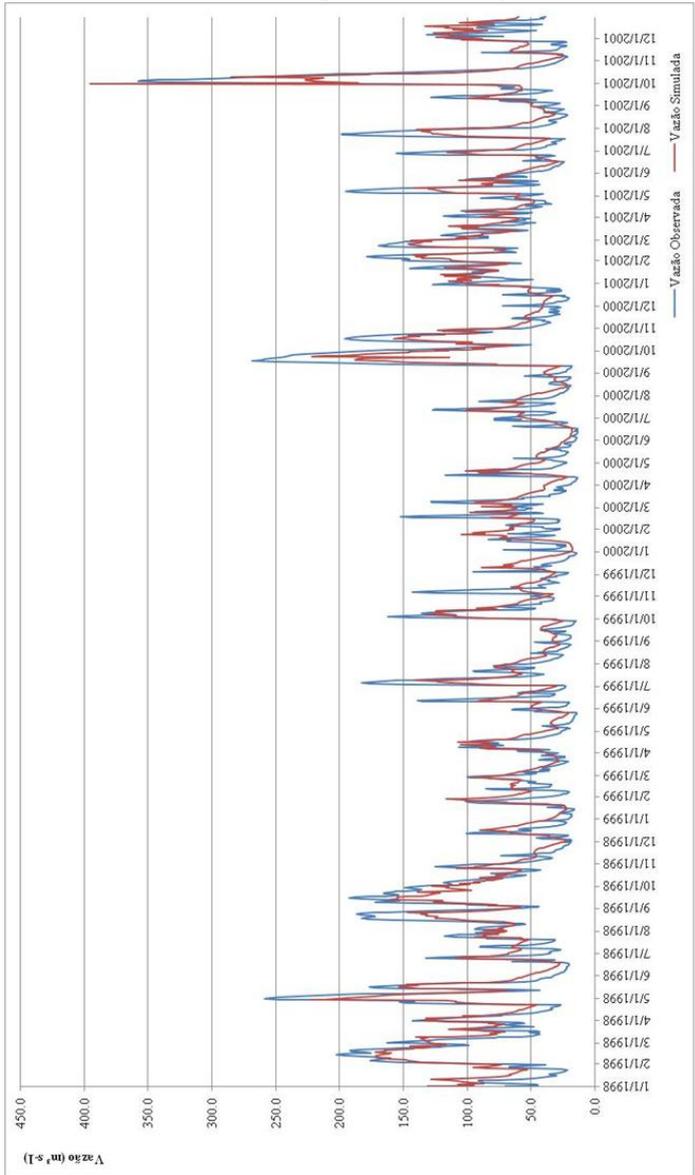
Figura 14 - Hidrogramas diários observado e simulado com calibração semi-automática, nos anos de 1996 e 1997.



Fonte: produção do próprio autor (SWAT-CUP).

Nota: data em formato americano: mm/dd/aaaa.

Figura 15 – Hidrogramas observado e simulado dos anos de 1998 a 2001 para escala diária no período de validação.

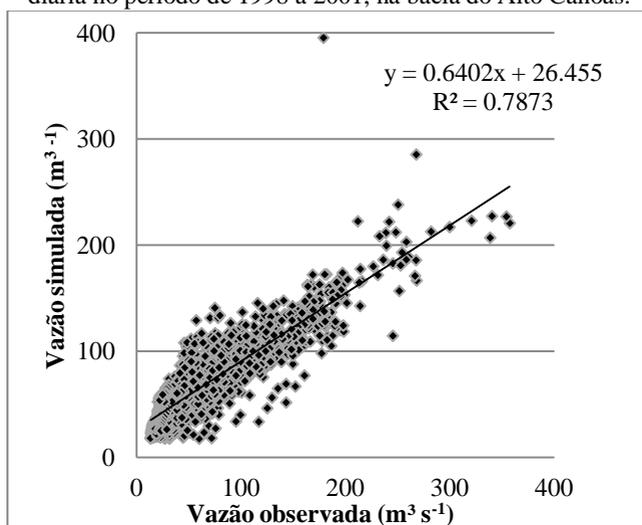


Fonte: produção do próprio autor (SWAT-CUP).
Nota: data em formato americano: mm/dd/aaaa.

Analisando-se a Figura 14, constata-se que as vazões intermediárias, quase que em toda sua totalidade, foram bem modeladas. Por outro lado, apesar da boa qualidade geral da calibração, percebe-se que o modelo teve dificuldades em modelar tanto as vazões de base como as vazões de picos, apesar dos massivos esforços para contornar este problema observado durante a calibração semi-automática. Contudo, nota-se pelo hidrograma que, para o período de validação, este problema está amenizado, tendo sido refletido, inclusive, no NSE e no R^2 .

O desempenho do modelo no período de validação também pode ser visualizado na plotagem dos dados observados contra os simulados (Figura 16). Nota-se, em termos gerais, que os dados obedecem à tendência central no ajuste, com poucos *out liers*, refletindo, portanto, na sua boa avaliação.

Figura 16 - Diagrama de dispersão das vazões observada e simulada na escala diária no período de 1998 a 2001, na bacia do Alto Canoas.



Fonte: produção do próprio autor.

6.2.2 Calibração e validação do modelo na escala mensal

O objetivo de calibrar o modelo na escala mensal foi analisar o comportamento hidrológico da bacia num intervalo de tempo maior que 1 dia, visando avaliar o potencial uso do modelo no gerenciamento dos recursos hídricos da bacia a longo prazo. Na escala mensal, os valores de entrada do modelo são valores médios do mês, como é o caso da precipitação e da vazão. Esta forma de agregação dos dados produz séries mais homogêneas, menos sujeitas a variações bruscas em relação às séries diárias. Além disso, a bacia do Alto Canoas possui uma área de drenagem razoavelmente grande, de modo que as respostas do sistema aos estímulos hidrológicos tendem a ser amenas.

A Tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros calibrados pelo processo automático e semi-automático com dados mensais. Na Tabela 10 são apresentadas as comparações dos parâmetros calibrados na escala diária e mensal.

Tabela 9 - Parâmetros de calibração do modelo SWAT na modelagem hidrológica da bacia do Alto Canoas na escala mensal³.

n°	Parâmetro Alterado	Método de Parametrização	Automático	Semi-automático	
1	GW_REVAP.gw	Substituição	0,020000	0,162282	
2	ESCO.hru	Substituição	0,950000	0,137905	
3	CH_N2.rte	Substituição	0,014000	0,047374	
4	CH_K2.rte	Substituição	0,000000	139,948135	
5	ALPHA_BNK.rte	Substituição	0,000000	0,582214	
6	SOL_AWC.sol	Cambissolo Neossolo Litólico	Multiplicação	0,050000	0,082589
				0,000000	-
7	SOL_K.sol	Cambissolo Neossolo Litólico	Multiplicação	8,300000	1,275143
				240,000000	1,275143
8	SOL_BD.sol	Cambissolo Neossolo Litólico	Multiplicação	1,400000	-0,975757
				0,000000	-
9	SFTMP.bsn	Substituição	0.500000	5,593212	
10	Precipitation.pcp	Multiplicação	*1	-0,170779	
11	CN2.mgt	Multiplicação	*2	0,270931	
12	CH_L2.rte	Substituição	*3	536,023499	
13	SURLAG.bsn	Substituição	4,000000	23,953220	
14	ALPHA_BF.gw	Substituição	0,048000	0,749803	

Fonte: produção do próprio autor.

³*1 : série histórica;

*2 : valor do parâmetro físico conforme cada uso da terra, classe de solo e classe de declividade (*HRU*);

*3 : valor do parâmetro físico conforme cada subbacia.

Tabela 10 – Comparação dos parâmetros calibrados na escala diária e escala mensal.

Ordem	Parâmetro	Valor Calibrado		Variação
		Escala Diária	Escala Mensal	
1	GW_REVAP	0,179880	0,162282	↓ 10%
2	ESCO	0,931943	0,137905	↓ 85%
3	CH_N2	0,066830	0,047347	↓ 29%
4	ALPHA_BNK	0,470856	0,582214	↑ 24%
5	SOL_AWC	0,178883	0,082589	-
6	SOL_K sol	1,003626	1,275143	-
7	SOL_BD	0,770128	-0,975757	-
8	SFTMP	-10,106767	5,593212	↑ 155%
9	SURLAG	3,370602	23,953220	↑ 611%
10	ALPHA_BF	0,499775	0,749803	↑ 50%

Fonte: produção do próprio autor.

Comparando-se os valores calibrados na escala mensal com os valores da escala diária, constata-se que os parâmetros GW_REVAP, CH_N2 e ALPHA_BNK apresentaram alterações inferiores a 30%. Os demais parâmetros apresentaram valores superiores, variando de 50% a 611%, para mais ou para menos. Os parâmetros que sofreram alteração para menos são GW_REVAP, ESCO, CH_N2, SOL_AWC, SOL_BD com destaque para este último. Por outro lado, os parâmetros que sofreram alterações para mais são ALPHA_BNK, SOL_K, ALPHA_BF e SURLAG, com destaque, novamente, para o último.

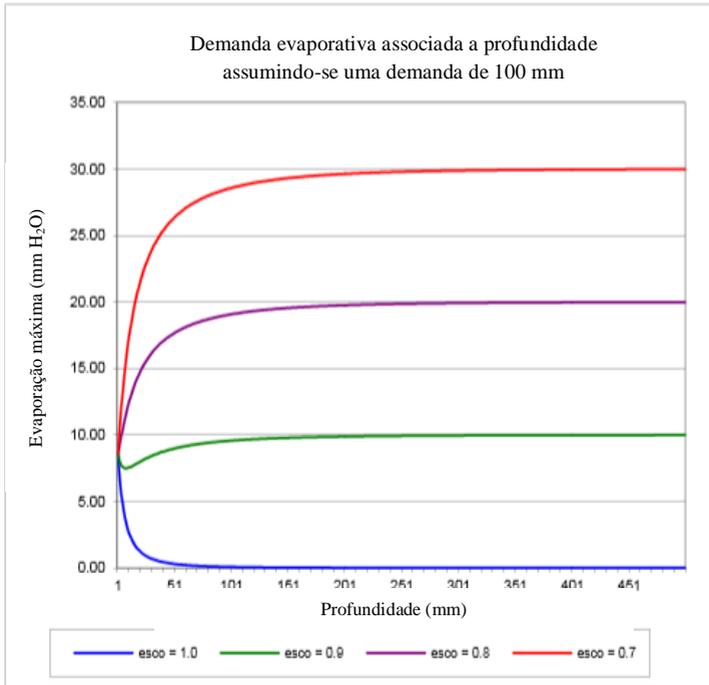
O aumento ou diminuição do valor de calibração de um determinado parâmetro na escala mensal, em relação ao valor calibrado na escala diária, pode ser um indicador do papel desempenhado pelo parâmetro na formação das vazões no exutório, na escala temporal considerada.

1. GW_REVAP: diminuiu cerca de 10%, ou seja, a quantidade relativa de água que se move do aquífero para a zona não saturada é ligeiramente menor na escala mensal do que na escala diária. De acordo com Arnold et al. (2012), o valor de REVAP deve estar entre 0,02 e 0,20, sendo que quanto mais próximo de 1 maior a importância deste processo no balanço hídrico. Conforme o mesmo autor, este processo de

transferência é significativa em bacias cuja zona saturada não está distante da superfície ou onde plantas com raízes profundas se desenvolvem. Estas condições são encontradas na bacia do Alto Canoas, prováveis razões pelas quais este parâmetro ter se situado próximo ao valor máximo indicado de 0,20, tanto na escala diária como na escala mensal.

2. ESCO: este parâmetro sofreu uma redução de 85% da escala diária para a escala mensal. De acordo com Arnold et. al. (2012), este coeficiente deve estar entre 0,01 e 1,0 e representa quanto em água que uma determinada profundidade do solo é capaz de suprir a demanda evaporativa do solo. De acordo com a Figura 17, a profundidade de 51 cm, por exemplo, é capaz de suprir diferentes demandas evaporativas do solo, conforme varia o coeficiente ESCO. Quanto maior o valor de ESCO, menor a capacidade de atendimento desta demanda. No caso da bacia do Alto Canoas, a diminuição em 85% do valor de ESCO da escala diária para a escala mensal indica que uma mesma profundidade de solo possui maior capacidade de atendimento das demandas evaporativas na escala mensal do que na diária. Isto pode ser explicado pela baixa velocidade de deslocamento das partículas de água do reservatório subterrâneo localizado no aquífero raso, em direção às camadas superficiais do solo que estão demandando evaporação.

Figura 17 - Distribuição da demanda evaporativa do solo relacionada à profundidade.



Fonte: Arnold et. al. (2012).

3. CH_N2: o coeficiente de rugosidade do canal diminuiu cerca de 30%, indicando que, na escala mensal, a rugosidade do canal deve ser reduzida em relação à escala diária para facilitar o escoamento ao longo do mesmo e conseqüente aumento da velocidade. Ressalta-se que este parâmetro foi dos que se mostraram mais sensíveis para o modelo, tanto na escala diária como na escala mensal, o que reforça a importância do canal na formação das vazões na bacia do Alto Canoas. De fato, SÁ (2014) também observou a relevância do fluxo do canal principal através da sensibilidade do parâmetro CHVel do modelo TOPMODEL aplicado na mesma bacia e calibrado no mesmo período do presente trabalho.
4. 4 e 10 : os fatores relacionados com o fluxo de armazenamento e fator de fluxo de base sofreram aumentos da ordem de 24% e de 50%, respectivamente. Estes fatores representam a

contribuição do reservatório subterrâneo para os canais. Quanto mais próximo da unidade, maior é a capacidade do reservatório subterrâneo suprir as demandas de vazão nos canais da bacia. No caso da bacia do Alto Canoas, o aumento destes fatores da escala diária para a mensal indica que o reservatório subterrâneo contribui de forma mais significativa com as vazões nos canais quando o espaço temporal analisado é maior e se considera valores médios. Isto pode também explicar a importância das reservas subterrâneas na manutenção das vazões dos canais nos períodos de estiagem.

Os parâmetros 5, 6 e 7 são apresentados em proporções aplicadas sobre seus valores originais, variáveis conforme a ocorrência de classe de solo em cada sub-bacia.

5. SOL_AWC: a quantidade de água disponível sofre um acréscimo no valor obtido na calibração automática menor na escala mensal em relação à escala diária. Apesar dos valores quase não serem alterados em relação ao valor consultado na literatura, esta menor redução pode estar relacionada com o direcionamento da água que, na escala diária, permanece armazenada no solo, mas que, na escala mensal, é direcionada para os canais.
6. SOL_K: este parâmetro sofre um aumento 27,5% maior na escala mensal do que na escala diária. Por conseguinte, o escoamento subsuperficial, é aumentado nesta proporção. O aumento verificado neste parâmetro é condizente com os aumentos nos parâmetros ALPHA_BNK e ALPHA_BF analisados acima.

Considerando conjuntamente os parâmetros ALPHA e SOL_AWC e SOL_K, conclui-se que na bacia do Alto Canoas as vazões na escala mensal são altamente influenciadas pelo fluxo de base.

7. SOL_BD: a redução em 97,58% do valor do parâmetro na escala mensal, contrastando com o acréscimo de 77,01% na escala diária, traz a densidade aparente básica do Cambissolo para $0,03 \text{ g cm}^{-3}$, o que aparentemente não tem sentido físico. Apesar disso, esta informação evidencia a maior importância da vazão básica em escala mensal, conforme vem se discutindo.

8. SFTMP: o aumento de 155% no parâmetro SFTMP, colocando-o em 5,59 °C, também não parece ter significado físico na bacia. É desejável que cada parâmetro de um modelo hidrológico, que possua base física, tenha, efetivamente, um valor relacionado com os atributos físicos do sistema que representa. Contudo, ao se calibrar um modelo, está-se diante de um conjunto de parâmetros, cujos valores poderiam ser diferentes e, mesmo assim, reproduzirem de forma satisfatória as saídas do sistema mediante um conjunto de dados de entrada.

Os valores dos parâmetros calibrados automaticamente a partir da escala mensal são os mesmos da escala diária. De um modo geral, o modelo calibrado automaticamente na escala mensal se mostrou mais satisfatório do que na escala diária. Nos anos de 1996 e 1997 sua eficiência apresentou um NSE de 0,35 (contra -3,13) e um R^2 de 0,70 (contra 0,05) (Figura 18).

Após a calibração semi-automática, o NSE passou a ser de 0,84 (contra 0,72), com um R^2 de 0,86 (contra 0,77). A Figura 19 ilustra estas séries de vazões.

No período de validação, o desempenho do modelo se mostrou ainda mais positivo, com um NSE de 0,87 (contra 0,76) e R^2 de 0,89 (contra 0,79) (Figura 20). Este NSE também foi obtido por Lubitz (2009) para a bacia do Ribeirão Concórdia em Lontras (NSE = 0,88) também utilizando o SWAT na escala mensal.

Marcon (2013) obteve resultado satisfatório na escala mensal, obtendo um NSE de 0,75 para a bacia hidrográfica estudada na região de Santa Maria, RS.

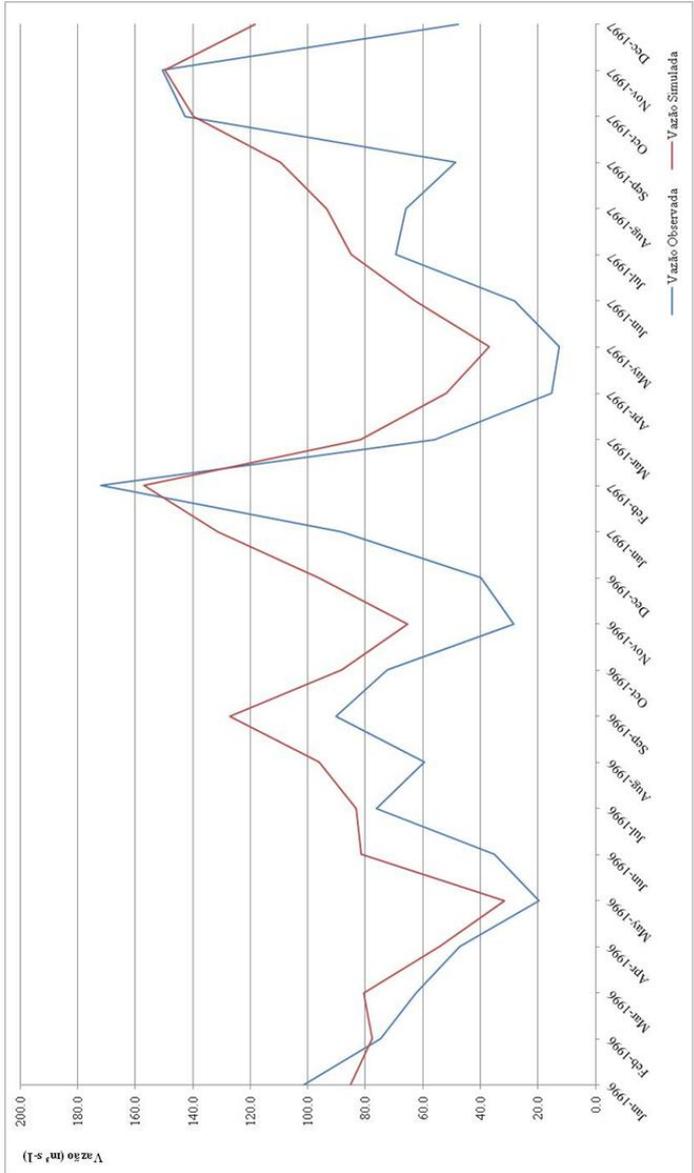
O desempenho do modelo no período de validação foi melhor que no período de calibração, tanto na escala diária como na escala mensal. Isto é positivo do ponto de vista da sua aplicação, pois o modelo mostrou-se efetivo, sendo válido e aplicável fora do período não utilizado no ajuste. Na escala mensal houve uma melhor representação das vazões observadas em relação à escala diária. Isto pode ser explicado pelo fato de que tanto para as vazões observadas quanto para o cálculo das vazões simuladas, se trabalham com médias dos dados diários. Dessa forma, aproximando-se mais de valores médios, diminui-se a variação dos dados (são atenuados os *outliers*) facilitando mais o ajuste e gerando uma melhor avaliação.

O uso de dados mensais é favorável do ponto de vista que se trabalha com um volume de dados menor que na escala diária, a aquisição desses dados por vezes é mais facilitada e ainda se tem um

menor esforço computacional para o processamento. Seria esta situação ideal para processamentos de longos períodos de tempo, para se ter uma ideia do comportamento da bacia sob um período mais abrangente.

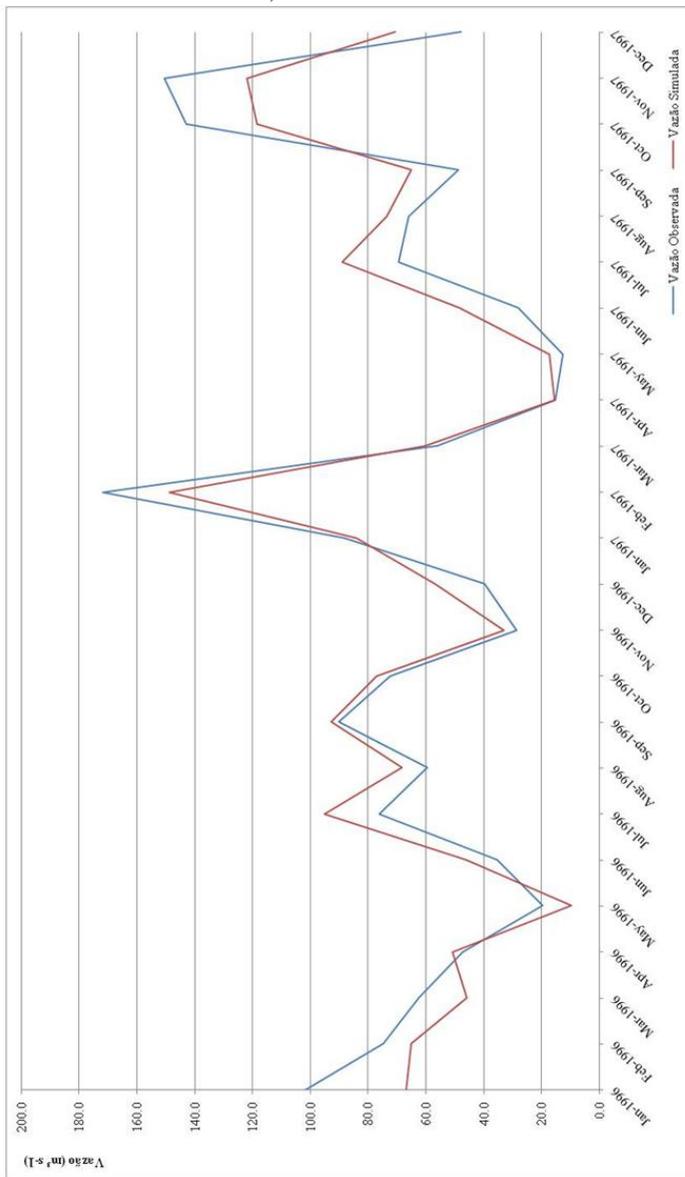
Por outro lado, análises mais localizadas, com uma resolução temporal maior, na qual se busque saber, por exemplo, o comportamento da vazão após uma chuva de alta intensidade, não é possível com a escala mensal. Tem-se aí ilustração da importância de uma modelagem na escala diária.

Figura 18 - Hidrogramas mensais observado e simulado com calibração automática, nos anos de 1996 e 1997.



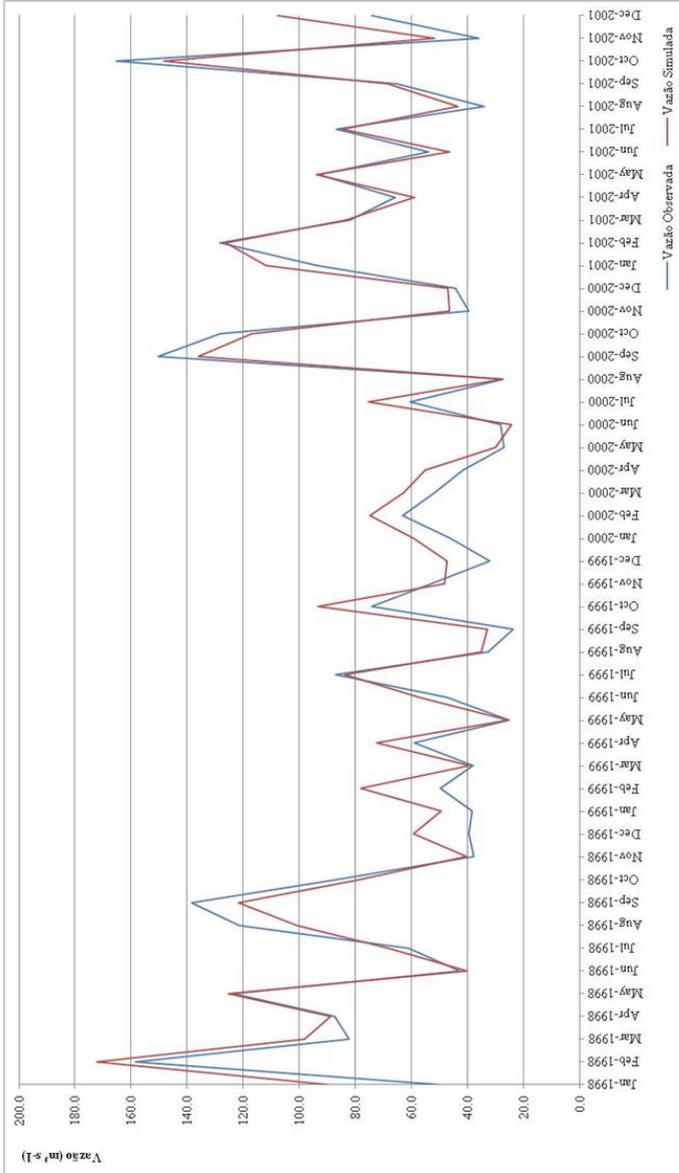
Fonte: produção do próprio autor (SWAT-CUP).

Figura 19 - Hidrogramas mensais observado e simulado com calibração semi-automática, nos anos de 1996 e 1997.



Fonte: produção do próprio autor (SWAT-CUP).

Figura 20 - Hidrogramas observado e simulado dos anos de 1998 a 2001 para escala mensal no período de validação.

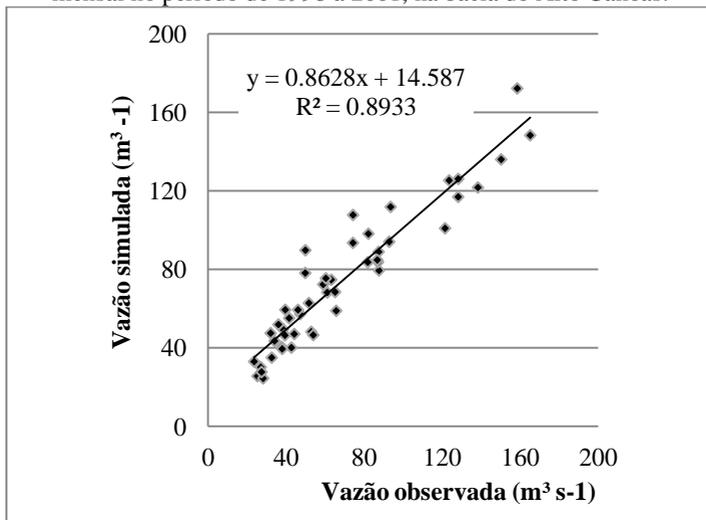


Fonte: produção do próprio autor (SWAT-CUP).

Como observado quando da calibração na escala diária, na escala mensal o modelo também apresenta dificuldades em simular as vazões de base e de pico. No entanto, a vazão simulada compreendeu melhor estas frações da vazão observada se comparada à escala diária.

Na Figura 21 são apresentados os dados de vazão observada e simulada pela qual se constata mais uma evidência referente ao bom comportamento do modelo na escala mensal.

Figura 21 - Diagrama de dispersão das vazões observada e simulada na escala mensal no período de 1998 a 2001, na bacia do Alto Canoas.



Fonte: produção do próprio autor.

Quanto à representatividade do modelo, conclui-se que o mesmo representa de modo satisfatório o sistema hidrológico da bacia do Alto Canoas e pode ser aplicado em estudos que envolvam ambas as escalas temporais. Este modelo tem condições de ser acoplado a um modelo climático para se conhecer o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica em estudos futuros. Na seção 6.5, o modelo é aplicado na análise de cenários de diferentes usos da terra, visando conhecer os impactos de sua alteração, bem como uma eventual expansão urbana e/ou agrícola em seu território.

(coeficiente de rugosidade do canal principal - Coeficiente de Manning). Em terceiro lugar aparecem os parâmetros SFTMP.bsn (temperatura para ocorrer a precipitação de neve) e ALPHA_BNK (fator de fluxo de armazenamento).

Em um primeiro momento, tentou-se calibrar o parâmetro CH_L2.rte de forma a alterar o seu valor em porcentagem para que sua variabilidade, conforme cada sub-bacia, não fosse perdida. No entanto, o modelo não correspondeu de modo satisfatório. Por esta razão, o parâmetro foi calibrado ao se atribuir um valor único para toda a bacia do Alto Canoas, ao que correspondeu positivamente. Esta particularidade pode ser explicada pelo fato de que as sub-bacias criadas automaticamente no ArcSWAT apresentam uma área superficial semelhante entre si, sem que, contudo, fossem construídos canais que se projetassem em boa parte de suas extensões. Desta forma, o tempo de concentração de toda a bacia do Alto Canoas foi padronizado através do aumento deste parâmetro físico.

O CH_N2.rte, que se refere à rugosidade do canal principal da bacia hidrográfica do Alto Canoas, também teve seu valor de parâmetro substituído para um índice mais alto do que o proposto pelo modelo na calibração automática. Esta alteração também reflete sobre o tempo de concentração da bacia hidrográfica, atrasando o fluxo de água no canal principal da bacia hidrográfica.

Percebe-se, com os dois parâmetros físicos mais sensíveis, uma necessidade em atrasar o tempo dos escoamentos, ou seja, aumentar o tempo de concentração para aproximar as vazões estimadas das vazões observadas. A necessidade em modelar o atraso da precipitação em relação ao exutório na seção de saída pode ser observada na Figura 13, onde os picos de vazão simulada sempre ocorrem antes dos picos da vazão observada.

O quarto e quinto parâmetros mais sensíveis, ALPHA_BNK.rte e SURLAG.bsn (coeficiente de atraso do escoamento superficial), respectivamente, também atuam conforme esse raciocínio, interferindo no tempo de concentração.

O parâmetro SFTMP.bsn (temperatura para ocorrer a precipitação de neve) foi sensível neste estudo em função de a bacia hidrográfica estar localizada em uma região subtropical. Unidades fisiográficas em locais mais quentes em geral não geram sensibilidade neste parâmetro físico ou esta é baixa, como observado nos trabalhos de Lubitz (2009) e Marcon (2013).

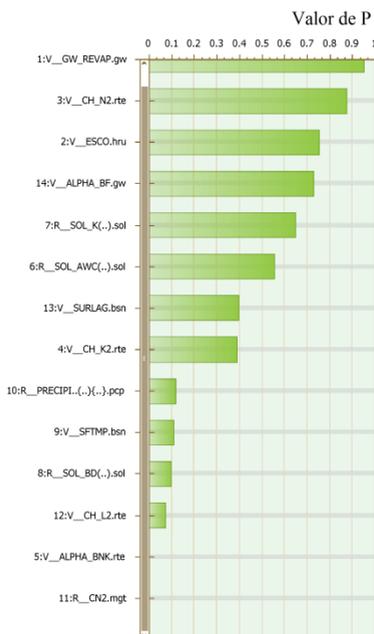
Ainda para o ajuste na escala diária, pode-se perceber que os três parâmetros de solo (SOL_K.sol, SOL_AWC.sol e SOL_BD.sol) mostraram sensibilidade semelhante, revelando um papel conjunto dos parâmetros físicos do solo para o ajuste.

Destaca-se também, dentre os sensíveis, uma quantidade representativa de parâmetros físicos relacionados diretamente a processos hidrológicos, tais como: ESCO.hru (coeficiente de compensação de evaporação no solo), ligado a evapotranspiração; GW_REVAP.gw (parâmetro controlador da quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes), relacionado a capilaridade e a ascensão de água no perfil do solo; Precipitation.pcp (dados diários de precipitação) e ALPHA_BF.gw (fator do fluxo de base), relacionado ao escoamento de base, o qual mantém a vazão básica dos canais.

Ressalta-se por este motivo também, a sensibilidade do parâmetro físico CN2.mgt (Curva Número para a condição II de umidade - chuvas nos últimos 5 dias totalizam entre 13 e 53 mm), que, apesar de estar diretamente relacionado a capacidade de infiltração de água no solo, foi o menos sensível entre os parâmetros físicos calibrados nesta escala.

A Figura 23 expõe a sensibilidade dos parâmetros físicos na escala mensal.

Figura 23 - Sensibilidade dos parâmetros físicos do modelo calibrados semi-automaticamente na escala mensal.



Fonte: produção do próprio autor (SWAT-CUP).

Na escala mensal, o parâmetro CN2.mgt é o mais sensível. Está ligado a capacidade de infiltração de água no solo, bem como ao escoamento superficial na bacia, sendo função do uso da terra, classe de solo e sua permeabilidade.

A explicação para que este venha se tornar o mais sensível para o ajuste de dados mensais está no agrupamento dos dados diários em médias mensais, o que diminui a importância relativa dos demais parâmetros físicos, bem como os relacionados ao tempo de concentração. Portanto, ao se trabalhar com médias mensais, o modelo passa a levar mais em consideração parâmetros físicos gerais e menos localizados, como este que está relacionado à infiltração de água no solo e, por consequência, ao escoamento superficial. Os parâmetros mais localizados podem ser exemplificados como os que estão relacionados ao canal principal da bacia hidrográfica ou de suas sub-bacias, ou seja, restritos a uma área específica na unidade fisiográfica em questão.

Ao se observar os parâmetros ALPHA_BNK (fator de fluxo de armazenamento) e o CH_L2.rte (comprimento do canal principal), segundo e terceiro mais sensíveis, observa-se que a importância relativa do tempo de concentração apenas diminuiu (parâmetro físico CH_N2.rte - coeficiente de rugosidade do canal principal, Manning - agora aparece como o penúltimo mais sensível) em relação à escala diária, mas ainda fatores ligados ao Tc são importantes para o correto ajuste dos dados na escala mensal. Um exemplo é o parâmetro de solo SOL_BD.sol (densidade aparente), relacionado com a capacidade de infiltração de água no solo.

Assim como na escala diária, o SFTMP.bsn (temperatura para ocorrer a precipitação de neve) mostra-se significativamente sensível na escala mensal. Destaca-se ainda como sensível em ambas escalas o parâmetro Precipitation.pcp (dados diários de precipitação), o qual também se trata de um parâmetro físico decorrente de um processo hidrológico de fundamental importância no ciclo da água e, portanto, mais abrangente (geral).

É oportuno salientar que a redução na taxa de precipitação através da calibração semi-automática em ambas escalas, ficou entre 17 e 18%, visando um melhor ajuste entre as vazões simuladas e observadas, podendo isto significar que o armazenamento de água no solo da bacia talvez seja maior que o calculado pelo modelo através dos dados de entrada. Pode indicar ainda que as estações pluviométricas utilizadas são incapazes de prever adequadamente as variações espaciais da precipitação no interior da bacia hidrográfica.

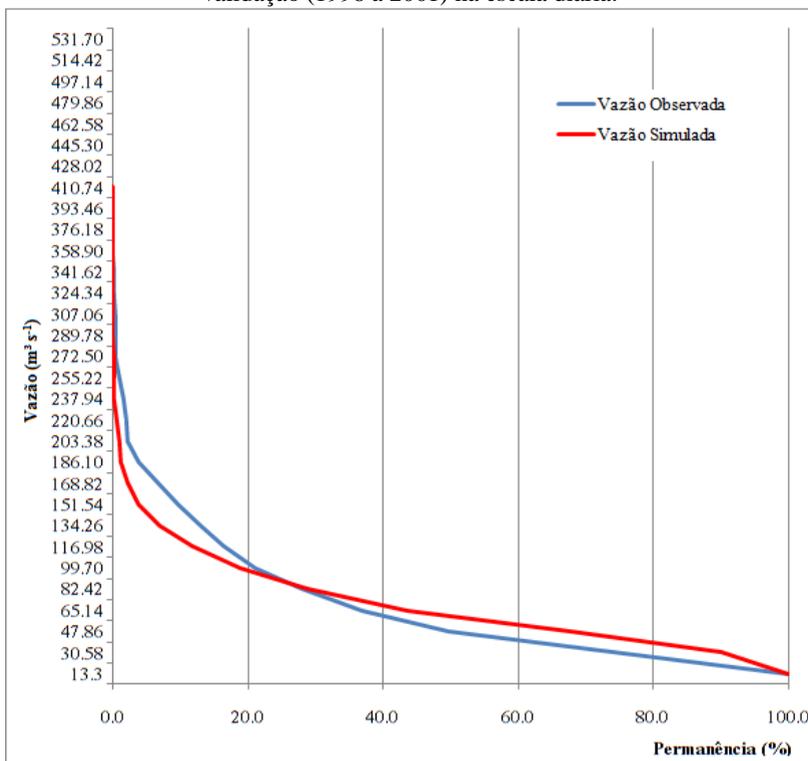
6.4 CURVA DE PERMANÊNCIA

O modelo calibrado na escala diária foi analisado através das curvas de permanência das vazões observada e estimada. O objetivo desta análise foi verificar o desempenho do modelo na estimativa futura da disponibilidade hídrica para fins de gestão dos recursos hídricos da bacia do Alto Canoas. A curva de permanência na escala diária é apresentada na Figura 24. A curva simulada foi contruída a partir das vazões estimadas no período de validação do modelo (1998 a 2001).

Em aproximadamente 27,5% do tempo de permanência total, ocorre a intersecção das duas curvas, quando a vazão é de aproximadamente $90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Antes deste ponto, o modelo tende a subestimar as vazões e após o mesmo tende a superestimá-las. Uma possibilidade a ser considerada seria utilizar este ponto como critério

para distinguir os períodos de permanência das vazões de base do período de permanência das vazões de pico. Assim sendo, o modelo estaria subestimando as vazões de pico e superestimando as vazões de base, ou seja, o modelo está retendo mais água na bacia do que efetivamente deveria, durante os eventos de maiores precipitações, e superestimando as vazões sub-superficiais e subterrâneas na direção do canal nos períodos de ausência de chuvas. É possível concluir que o modelo tende a superestimar a disponibilidade hídrica crítica na escala diária, o que deve ser levado em consideração quando da elaboração do plano da bacia.

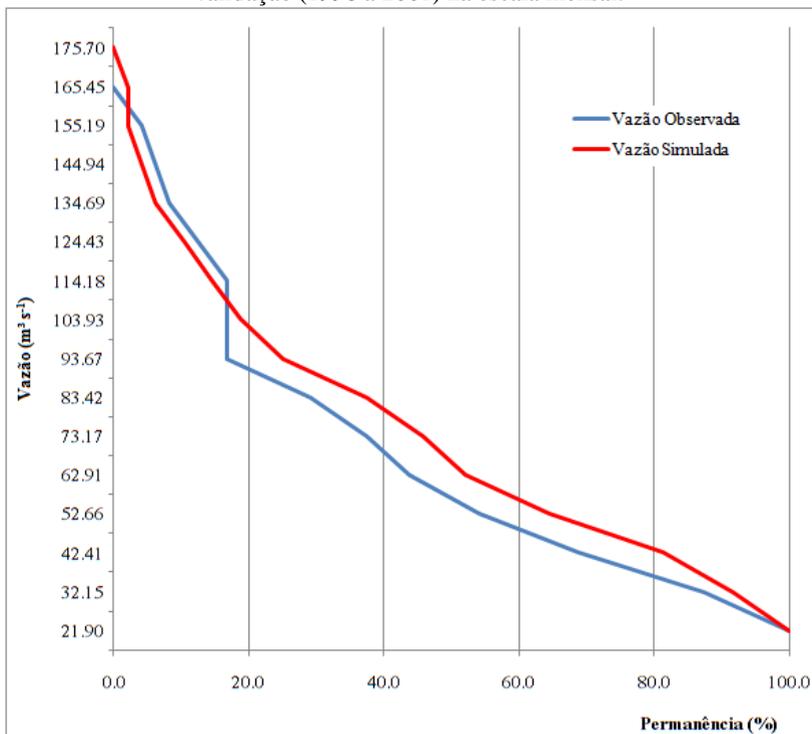
Figura 24 - Curva de permanência observada e estimada no período de validação (1998 a 2001) na escala diária.



Fonte: produção do próprio autor.

As curvas de permanência na escala mensal podem ser observadas na Figura 25.

Figura 25 - Curva de permanência observada e estimada no período de validação (1998 a 2001) na escala mensal.



Fonte: produção do próprio autor.

A escala mensal é gerada a partir da média dos dados diários para a vazão observada, por isso os valores são menos extremos se comparados as curvas na escala diária. No entanto, na vazão simulada, a curva é gerada a partir de uma modelagem diferente da escala diária, inclusive com parâmetros calibrados diferentemente como já mencionado.

Assim como nas curvas de permanência da escala diária, na escala mensal também ocorre uma intersecção entre as duas curvas e que, antes desse ponto, o modelo novamente subestima as vazões e após o mesmo, superestima. No entanto esse cruzamento ocorre antes, em 17% de permanência em uma vazão aproximada de $108 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Além disso, ao se observar a diferença entre ambas as escalas pode-se observar que na mensal não ocorre um achatamento das curvas tão próximo as menores vazões, tanto para a vazão observada quanto

para a simulada. Isto reforça a ideia de que na escala mensal existe uma importância maior dos reservatórios para a manutenção da vazão total na seção de saída da bacia.

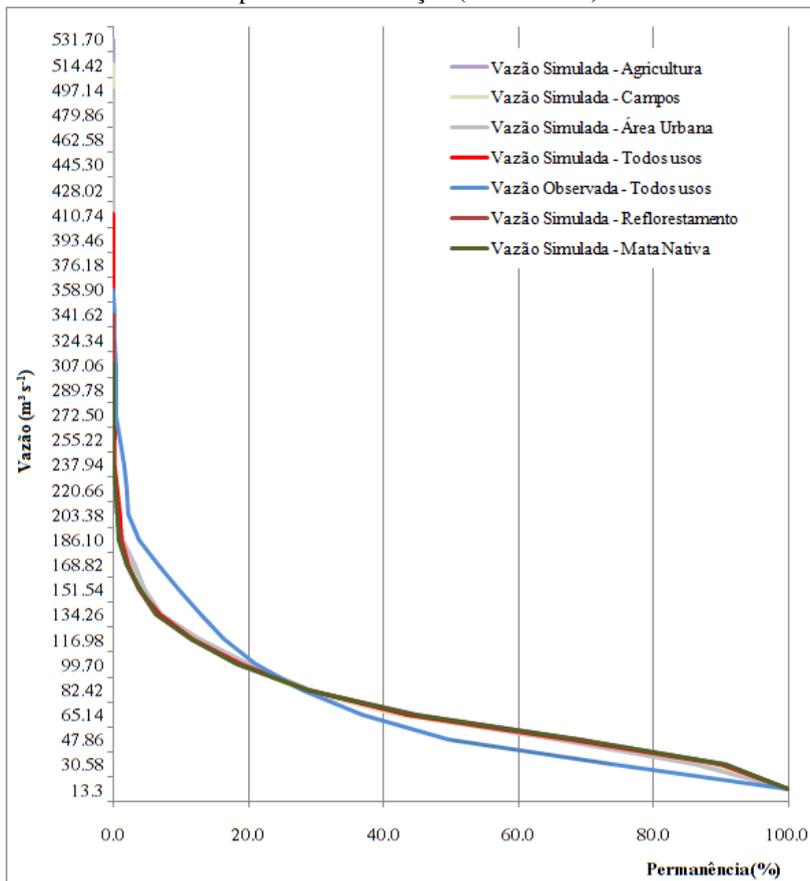
6.5 ANÁLISE DE IMPACTOS DO USO DO SOLO NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA DO ALTO CANOAS

Outro estudo realizado foi a aplicação do modelo, já validado, na análise de diferentes cenários de uso da terra e seus impactos na disponibilidade hídrica da bacia, através de suas respectivas curvas de permanências na escala diária. Para tanto, considerou-se situações extremas em que a bacia hidrográfica fosse submetida a um único uso, conforme as classes interpretadas neste trabalho: agricultura, campo, área urbana, floresta nativa, reflorestamento.

Comparou-se a curva da vazão observada com a curva da vazão simulada nas condições de uso atual, com as supostas curvas de vazões produzidas nos cenários em que a bacia estivesse submetida a apenas um uso da terra. A Figura 26 apresenta as curvas de permanências dos diferentes cenários na escala diária.

Ao se observar o gráfico, percebe-se que as curvas dos cenários simulados são próximas da curva simulada para o uso atual. Pequenas diferenças são observadas nos períodos das vazões maiores produzidas nos usos agrícola, campos e área urbana, as quais apresentaram as maiores vazões simuladas. Estes usos, de acordo com o modelo, tenderiam a produzir descargas levemente superiores no exutório ao longo do tempo do que o uso atual. Na mesma medida, os usos da terra que atenuaram as vazões maiores foram os de mata nativa e de reflorestamento. Tais comportamentos seriam efetivamente esperados uma vez que o selamento superficial, compactação do solo, entre outros fatores relacionados aos usos agrícolas, campos e áreas urbanas, atuam nos processos hidrológicos relacionados com o escoamento superficial, tendendo a aumentá-lo. Em relação a estas, as áreas florestais propendem a favorecer a interceptação, infiltração, percolação e promover uma maior retenção de água no solo, com a consequente diminuição da descarga imediata nos rios.

Figura 26 - Curva de permanência das vazões simuladas através dos diferentes cenários durante o período de validação (1998 a 2001) na escala diária.



Fonte: produção do próprio autor.

A baixa sensibilidade das curvas de permanências em relação a alterações drásticas no uso da terra pode estar relacionada com os seguintes fatores:

- a) O relevo predominantemente irregular exerceria um papel mais expressivo na regulação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do que o próprio uso do solo. Terrenos declivosos dificultam a infiltração de água no solo e, por isso, não permitem que os diferentes usos da terra gerem grandes diferenças nas curvas de permanências resultantes.

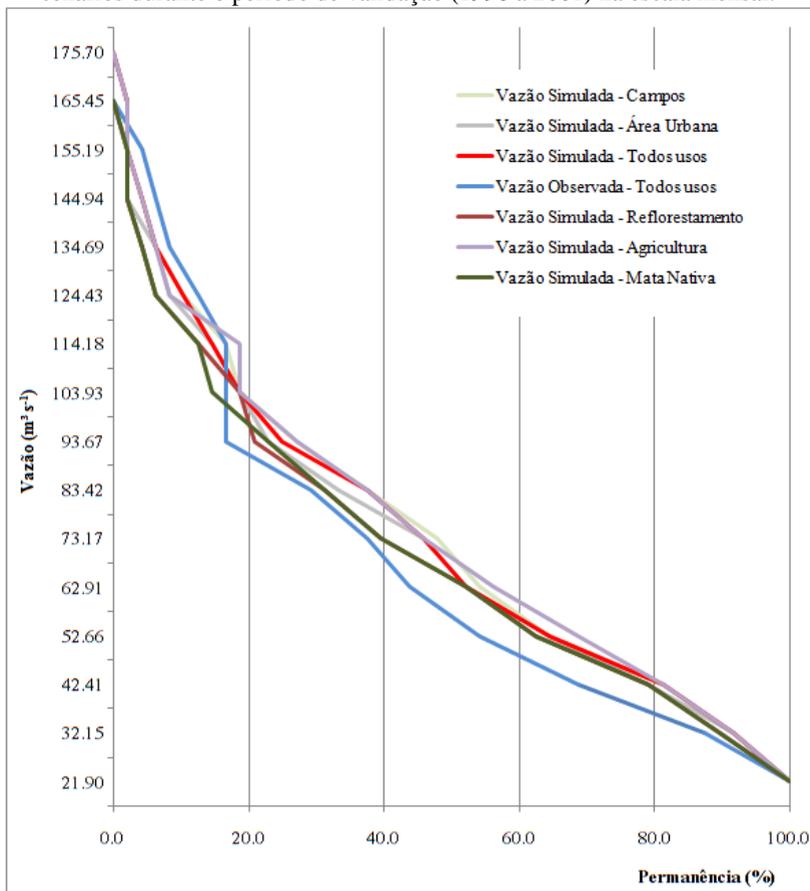
- b) A análise de sensibilidade dos parâmetros na escala diária indicou que a bacia é sensível a fatores relacionados aos canais (CH_L2, CH_N2), temperatura local (SFTMP.bsn) e armazenamento no solo (ALPHA_BNK). Destes, o parâmetro ALPHA_BNK seria o mais afetado pelos usos do solo. Contudo, conforme a resposta das curvas simuladas, não é significativamente afetado a ponto de produzir grandes alterações na permanência das vazões nesta bacia.
- c) Os cenários foram gerados apenas nos 4 anos do período de validação, o que pode ter sido insuficiente numa análise de longo prazo.
- d) A curva de permanência não seria a ferramenta de análise adequada para este tipo de estudo, por não ser supostamente sensível a ponto de identificar as nuances no uso do solo.

No decorrer das curvas, aproximadamente a partir da ordenada de 30% de permanência (vazão de $82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), ou seja, em 70% do tempo de permanência das vazões, percebe-se uma inversão do trajeto das curvas, apesar da baixa sensibilidade em relação ao uso da terra. A curva referente as vazões de uma suposta bacia coberta totalmente com mata nativa passa a estar acima das demais, e a curva referente a área urbana, aparece abaixo em relação a todas as vazões simuladas (a vazão observada é a com menor permanência na presente situação). Isto indica o cumprimento esperado do papel executado pela mata nativa: um maior armazenamento da água na bacia hidrográfica, o qual promove vazões básicas mais elevadas.

Comportamento inverso é observado pela área urbana, onde a mesma, em função da maior impermeabilização do solo, dificulta o armazenamento de água pelo solo, ocasionando vazões de picos mais altas e, a partir do término da precipitação, vazões básicas menos significativas.

Na Figura 27 se observam as curvas de permanências dos diferentes cenários na escala mensal.

Figura 27 - Curva de permanência das vazões simuladas através dos diferentes cenários durante o período de validação (1998 a 2001) na escala mensal.



Fonte: produção do próprio autor.

Percebe-se, neste caso, uma diferença muito maior entre as curvas se comparado a escala diária. Isso pode ser explicado pelos diferentes parâmetros sensíveis nas duas modelagens com diferentes escalas temporais, pois na escala mensal foram mais sensíveis os parâmetros (CN2 e ALPHA_BNK) que regulam de forma mais direta processos hidrológicos como a infiltração e, conseqüentemente, o escoamento superficial.

Com relação ao comportamento das curvas dos cenários, novamente se observam que as maiores vazões se dão nos usos agrícola

e urbano. Do contrário, as menores vazões de pico são observadas no cenário de mata nativa. Estas diferenças são observadas nas porcentagens de permanência mais altas, quando as curvas são mais distintas. A partir dos 50%, quando se trata das vazões mais básicas, as curvas voltam a ficar próximas inclusive da vazão simulada com o uso atual.

6.6 SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS BÁSICO E SUPERFICIAL OBSERVADOS E ESTIMADOS PELO MODELO SWAT ATRAVÉS DE FILTRO NUMÉRICO

Os escoamentos superficial e subterrâneo são os principais formadores das vazões nos canais. A partir do hidrograma no exutório é possível determinar a contribuição de cada parcela utilizando métodos gráficos, para eventos isolados, ou filtros numéricos, para série de eventos.

O objetivo desta análise na bacia do Alto Canoas está no estudo da capacidade de manutenção das vazões no seu exutório, a partir de dados climáticos estimados por modelos climatológicos, seja na escala diária, seja na escala mensal.

6.6.1 Escala diária

As vazões básicas na escala diária foram obtidas pela aplicação do Filtro de Chapman, na qual se considerou a constante de recessão (k) igual a 14, calculado a partir de um período de recessão hídrica entre os meses de maio e junho de 1998.

A Figura 28 apresenta os hidrogramas observado e estimado no período de calibração (1996 e 1997) na escala diária.

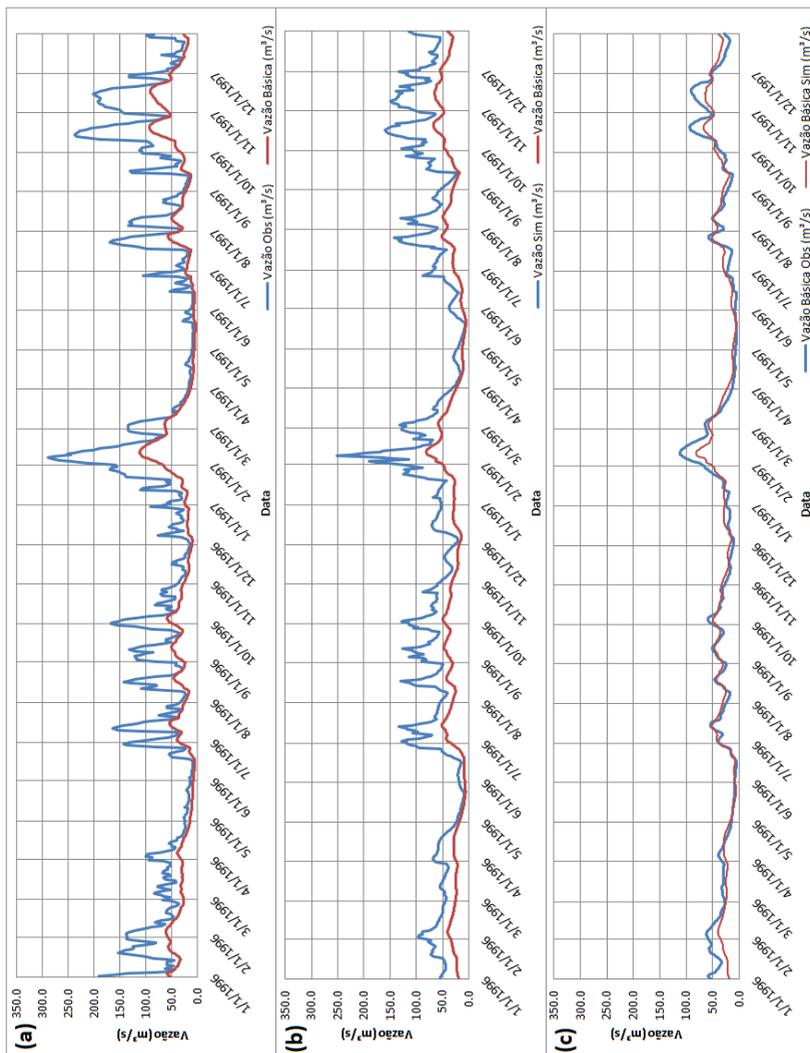
De acordo com Collischonn & Dornelles (2013), este filtro tem boa resposta em regiões com pouca contribuição do escoamento de base. A bacia hidrográfica do Alto Canoas, predominantemente coberta pela classe Neossolo litólico (solos rasos) e com relevo bastante declivoso, é um local representativo para a aplicação deste filtro.

Considerando que no período de calibração o modelo não foi capaz de se ajustar perfeitamente as vazões de pico, as vazões básicas simuladas respectivas também se mostraram abaixo das vazões básicas calculadas com base nas vazões totais observadas. No entanto, nas vazões intermediárias e pequenas, as vazões básicas simuladas estão bem próximas das vazões básicas observadas, acabando por refletir em

um NSE de 0,77 e R^2 de 0,82. Estes valores são melhores inclusive que o ajuste para a vazão total, que foi de 0,72 para o NSE e 0,77 para o R^2 .

A Tabela 11 apresenta os volumes totais de precipitação, escoamento superficial direto (ESD) e escoamento básico para o período de 1996 e 1997, no qual se aplicou o filtro.

Figura 28 - Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de calibração na escala diária (1996 a 1997).
 (a) Separação dos escoamentos no hidrograma observado. (b) Separação dos escoamentos no hidrograma simulado. (c) Hidrogramas das vazões básicas observada e simulada.



Fonte: produção do próprio autor.

Nota: data em formato americano: mm/dd/aaaa.

Tabela 11 - Volumes totais de precipitação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial e escoamento básico para os anos de 1996 e 1997.

Volumes totais	Observado	Simulado
Altura total precipitada (mm)	3,316,19	
Volume total escoamento básico (mm)	1,055,21	1,017,58
Volume total escoamento superficial e escoamento subsuperficial (mm)	1,074,07	1,030,34
Coefficiente de escoamento superficial médio (C)	0,32	0,31

Fonte: produção do próprio autor.

Na Figura 29 se podem observar os resultados no período de validação (anos de 1998 a 2001).

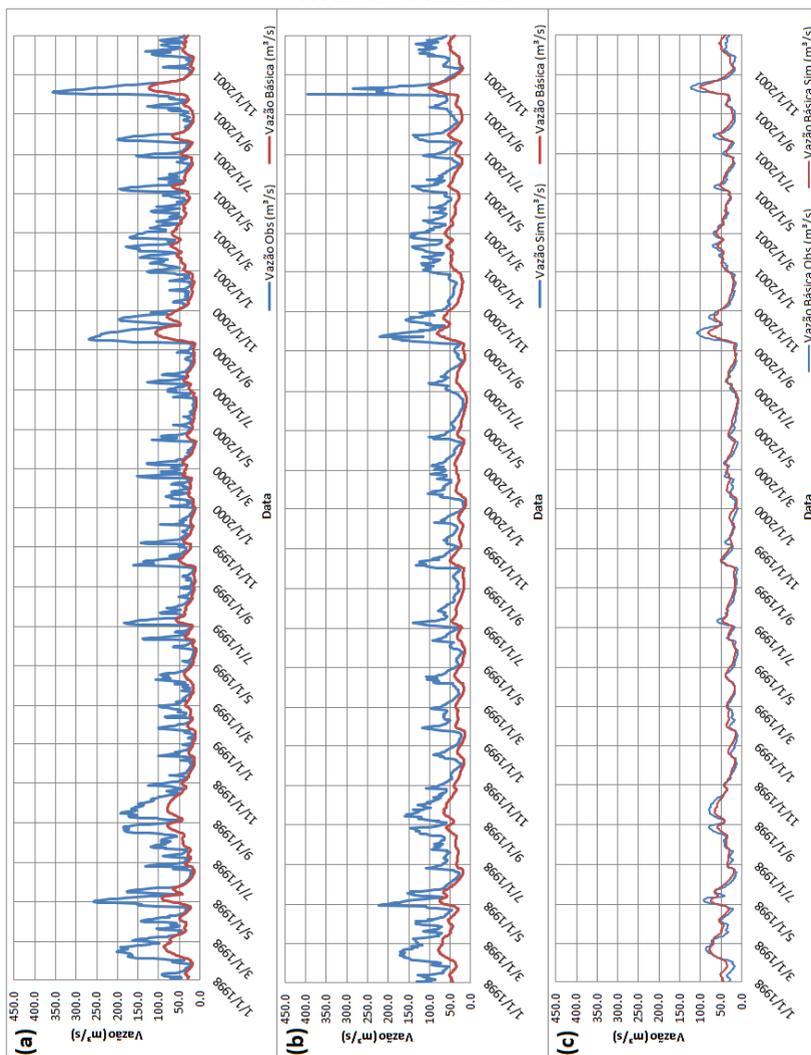
Para os anos de validação do modelo, percebe-se também um melhor ajuste da vazão básica simulada em relação à vazão básica calculada com base nas vazões totais observadas. Isto pode ser atribuído ao melhor ajuste do modelo neste período em relação ao período de calibração. No período de validação, também se observam problemas de ajuste nos eventos de pico, no entanto, em um grau menor se comparado ao período de calibração.

O bom ajuste para o período mencionado está refletido no NSE igual a 0,84 e R^2 igual a 0,87, ao passo que no mesmo período, quando do ajuste para a vazão total na escala diária, ficaram em 0,76 e 0,79, respectivamente.

Percebe-se dessa forma que, apesar de o ajuste da vazão total, nos eventos com menores vazões, não ter sido totalmente correto, o modelo ainda assim conseguiu representar de forma satisfatória as vazões básicas da bacia hidrográfica estudada, podendo ser recomendado como ferramenta na gestão dos recursos hídricos.

Na Figura 30 é apresentado o diagrama de dispersão da vazão básica estimada e vazão básica calculada com base na vazão total observada durante o período de validação do modelo (1998-2001) para a escala diária. A Tabela 12 expõe os volumes totais precipitados, de escoamento superficial direto e escoamento básico do mesmo período.

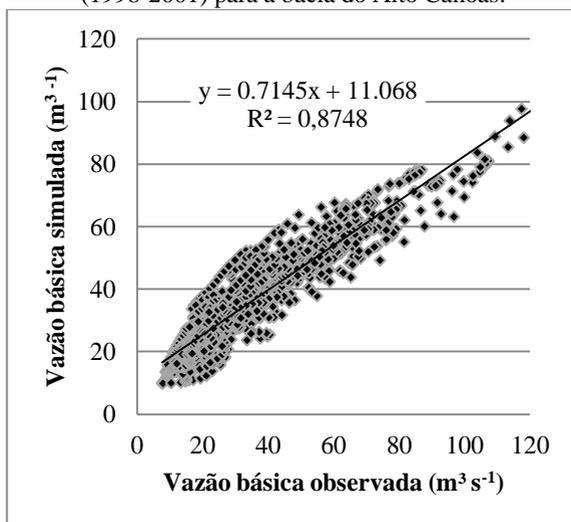
Figura 29 - Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de validação na escala diária (1998 a 2001). (a) Separação dos escoamentos no hidrograma observado. (b) Separação dos escoamentos no hidrograma simulado. (c) Hidrogramas das vazões básicas observada e simulada.



Fonte: produção do próprio autor.

Nota: data em formato americano: mm/dd/aaaa.

Figura 30 - Diagrama de dispersão da vazão básica diária calculada a partir da vazão total observada e estimada pelo modelo SWAT no período de validação (1998-2001) para a bacia do Alto Canoas.



Fonte: produção do próprio autor.

Considera-se que o ajuste foi muito bom, podendo se considerar, inclusive, melhor se comparado ao observado no período de validação na escala diária para a vazão total, o que se reflete no coeficiente R^2 .

A equação de reta exposta na Figura 29 pode ser utilizada para melhorar a estimativa da vazão básica, a partir da vazão básica calculada pelo modelo (Equação 23).

$$VBC_i = \frac{VBE_i - 11,068}{0,7145} \quad (23)$$

Onde: VBC_i : vazão básica corrigida para o i -ésimo dia; VBE_i : vazão básica estimada pelo modelo para o i -ésimo dia.

A vazão básica corrigida pode ser adotada para fins de análise de disponibilidade hídrica futura para que se possa, então, inferir com maior segurança para a tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos.

Tabela 12 - Volumes totais de precipitação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial e escoamento básico para os anos de 1998 a 2001.

Volumes totais	Observado	Simulado
Altura total precipitada (mm)	7,030,93	
Volume total escoamento básico (mm)	2,145,32	2,240,76
Volume total escoamento superficial e escoamento subsuperficial (mm)	2,211,35	2,240,68
Coefficiente de escoamento superficial médio (C)	0,31	0,32

Fonte: produção do próprio autor.

As Tabelas 11 e 12 indicam o bom ajuste do modelo, pois tanto no período de calibração (1996 e 1997), quanto no período de validação (1998 a 2001) os volumes totais observados e estimados foram próximos. O mesmo se pode afirmar quanto ao coeficiente de escoamento superficial médio.

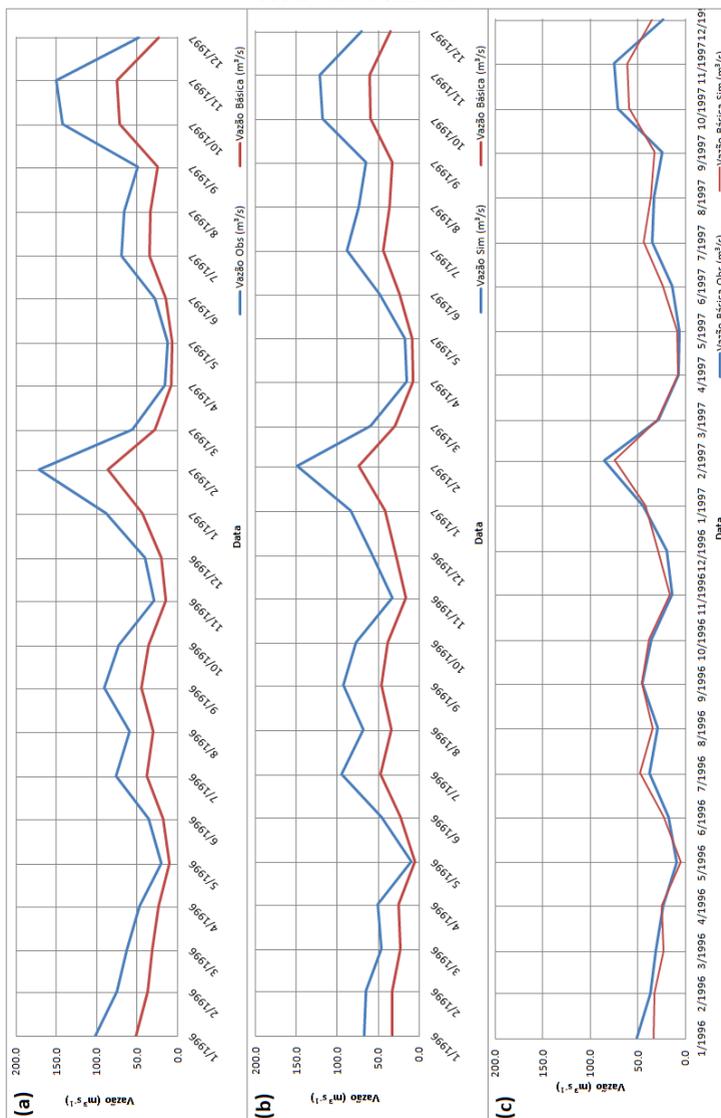
O excelente comportamento do modelo, principalmente no período de validação em relação aos volumes totais e coeficiente C, indicam que o mesmo pode ser utilizado para prever as vazões e inferir sobre a disponibilidade hídrica futura. Dessa forma, pode se dizer viável, inclusive, a alternativa do acoplamento de um modelo climático visando a antecipação do comportamento da bacia hidrográfica em longo prazo.

6.6.2 Escala mensal

As vazões básicas para a escala mensal foram obtidas pelo mesmo Filtro de Chapman, no entanto a constante de recessão considerada foi de 0,48 calculado a partir do mesmo período de recessão da escala diária. A diferença na constante k é atribuída a diferença entre as escalas temporais.

Na Figura 31 se observam as vazões básicas para a escala mensal no período de calibração. Observa-se um ajuste ainda melhor se comparado a escala diária, no entanto ainda se observaram dificuldades quando em vazões de pico. Os coeficientes de avaliação do ajuste ficaram em 0,84 para o NSE e 0,86 para o R², os mesmos se comparados ao ajuste da vazão total para escala mensal.

Figura 31 - Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de calibração na escala mensal (1996 a 1997). (a) Separação dos escoamentos no hidrograma observado. (b) Separação dos escoamentos no hidrograma simulado. (c) Hidrogramas das vazões básicas observada e simulada.



Fonte: produção do próprio autor.

A Figura 32 apresenta as vazões básicas no período de validação para a escala mensal. Novamente esta escala temporal mais abrangente apresenta um melhor ajuste se comparada a escala diária.

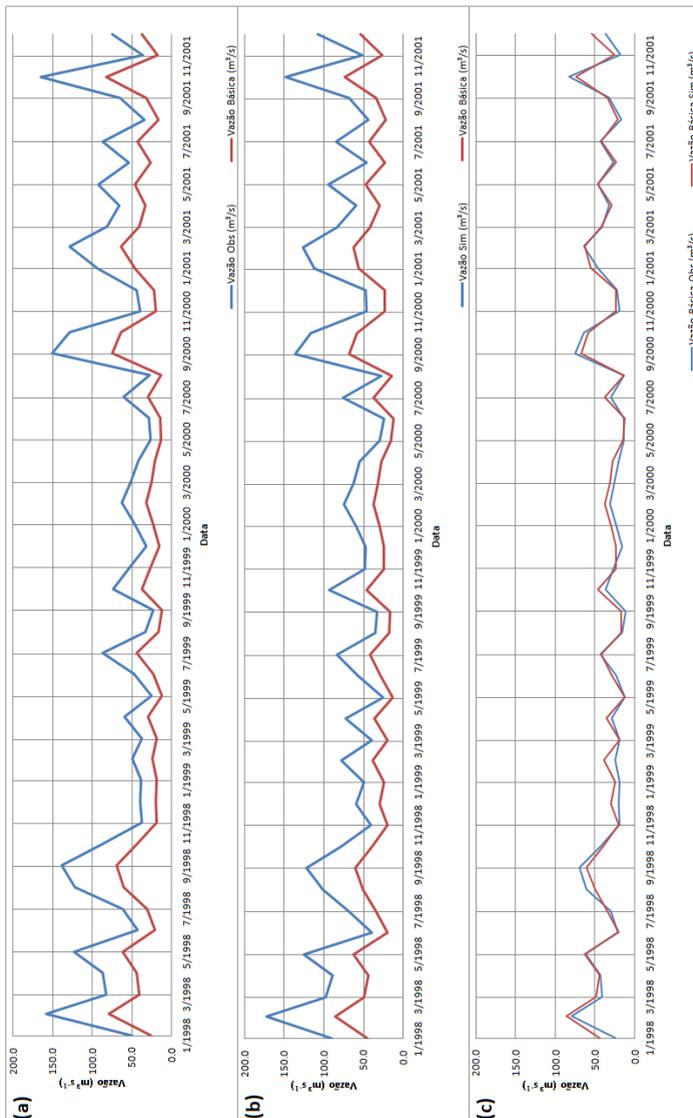
Também é possível de se observar um melhor ajuste se o presente for comparado ao período de calibração. Isto pode ser demonstrado através dos valores de NSE, que ficou em 0,87 e o R^2 , que foi de 0,89. Novamente os mesmos coeficientes da modelagem da vazão total no período de validação para a escala mensal.

Assim como na escala diária, na escala mensal o cálculo das vazões básicas com o filtro de Chapman a partir das vazões totais simuladas pelo modelo também pode ser considerada uma ferramenta válida no auxílio a tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos.

O diagrama de dispersão da vazão básica estimada e vazão básica calculada com base na vazão total observada durante o período de validação do modelo (1998-2001) para a escala mensal é apresentado na Figura 33.

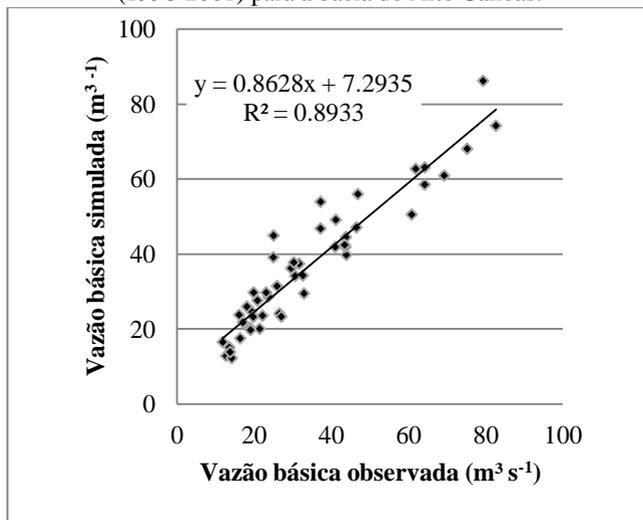
Figura 32 - Separação dos escoamentos básico e superficial pelo Filtro Numérico de Chapman no período de validação na escala mensal (1998 a 2001).

(a) Separação dos escoamentos no hidrograma observado. (b) Separação dos escoamentos no hidrograma simulado. (c) Hidrogramas das vazões básicas observada e simulada.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 33 - Diagrama de dispersão da vazão básica mensal calculada a partir da vazão total observada e estimada pelo modelo SWAT no período de validação (1998-2001) para a bacia do Alto Canoas.



Fonte: produção do próprio autor.

Novamente a partir do diagrama de dispersão dos dados na escala mensal se pode comprovar o bom ajuste das vazões básicas.

Assim como para a escala diária, a equação de reta exposta na Figura 33 pode ser utilizada para melhorar a estimativa da vazão básica, a partir da vazão básica calculada pelo modelo (Equação 24).

$$VBC_i = \frac{VBE_i - 7,2935}{0,8628} \quad (24)$$

Onde: VBC_i : vazão básica corrigida para o i -ésimo dia; VBE_i : vazão básica estimada pelo modelo para o i -ésimo dia.

7 CONCLUSÃO

O modelo hidrológico SWAT se mostrou adequado para a simulação das vazões na seção de saída da bacia hidrográfica do Alto Canoas.

Um bom ajuste do modelo foi alcançado tanto para escala diária (NSE de 0,76 na validação) quanto para a escala mensal (NSE de 0,87 na validação). Como demonstrado pelos índices, o ajuste para a escala mensal foi melhor do que para a escala diária. Escalas de trabalho mensais são vantajosas sob o ponto de vista de que seus dados de entrada são adquiridos com maior facilidade, além de demandarem um menor esforço computacional para processamento.

Em ambas escalas de tempo, a resposta do modelo no período de validação foi melhor do que no respectivo período de calibração. Conclui-se que o modelo estima de forma bastante satisfatória a vazão na seção de saída da bacia hidrográfica.

Em função de seu bom ajuste, a presente modelagem tem condições de ser acoplada a um modelo climático visando conhecer o comportamento hidrológico da bacia do Alto Canoas no futuro.

Os parâmetros físicos mais sensíveis na escala diária foram o CH_L2.rte e o CH_N2.rte, diretamente associados ao canal principal da bacia hidrográfica. Já para a escala mensal, foram os parâmetros CN2.mgt (curva número) e ALPHA_BNK (fator de fluxo de armazenamento). Pode-se concluir que, na escala diária, os parâmetros distribuídos detêm uma importância relativa maior que na escala mensal. Na escala mensal, os parâmetros físicos mais relevantes são os que controlam processos associados ao solo, como infiltração e o armazenamento de água no solo em toda bacia hidrográfica.

De acordo com os parâmetros validados do modelo, bem como com o balanço hídrico da bacia, pode-se concluir que o escoamento básico possui importância significativa na composição da vazão total da bacia hidrográfica do Alto Canoas. Além disso, através do balanço hídrico gerado pelo modelo, conclui-se que a cada 20 anos acumulam-se volumes de percolação profunda capazes de abastecer o Aquífero Guarani equivalentes ao volume médio anual percolado ao aquífero raso, já que a bacia se encontra em uma área de recarga do mesmo.

Apesar do bom ajuste do modelo, através da análise das curvas de permanência observada e simulada constatou-se que o modelo pode estar superestimando as vazões de base, pois além da constatação nas

curvas de permanência é visível a deficiência no ajuste em períodos de recessão hídrica.

A curva de permanência estimada pelo modelo na escala diária não demonstrou ser um instrumento de análise sensível às mudanças drásticas no uso do solo para na escala mensal. Espera-se que alteração no uso como ocupação total da bacia por área urbana implique em consequências hidrológicas significativas, o que não ficou evidente neste estudo. Problemas de impermeabilização, aumento significativo do escoamento superficial, alteração no regime hidrológico do canal principal, entre outros fatores, precisam ser avaliados através de outros instrumentos de análise nesta escala temporal. Por outro lado, na escala mensal foram mais nítidas as alterações no comportamento dos regimes das vazões como se poderia supor.

A estimativa das vazões básicas na escala diária foi satisfatória, tanto no período de calibração quanto no de validação, a exemplo do que ocorreu com a série de vazões totais. A análise de disponibilidade hídrica, pelas vazões mínimas, visando à tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica, pode ser realizada através do modelo. O mesmo estudo para a escala mensal também correspondeu satisfatoriamente e, da mesma forma, tem condições de ser utilizado como ferramenta na gestão.

8 RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista que o presente trabalho praticamente esgotou as possibilidades de estudo das vazões na bacia do Alto Canoas com o modelo SWAT, uma possível sugestão destinada aos pesquisadores consiste em dar um passo a mais no sentido de aumentar o rigor científico das pesquisas nesta área. Isso poderia ser realizado ao levantar a campo os parâmetros físicos das classes de solo para alimentação no banco de dados do modelo SWAT. Dessa forma, os valores seriam diretamente relacionados a região de estudo e não referentes a valores médios advindos de consultas na literatura. Assim, espera-se um ganho na avaliação do ajuste do modelo tanto na sua calibração quanto validação.

Como sugestão aos gestores e construtores do plano de bacia, salienta-se que todas as ferramentas desenvolvidas e utilizadas neste trabalho tiveram desempenho satisfatório e podem ser utilizadas no auxílio a gestão da bacia hidrográfica.

A modelagem hidrológica na escala mensal se mostrou bastante eficaz, com bons coeficientes de avaliação e inclusive, bom ajuste ao hidrograma observado, no entanto, observa-se que o mesmo considera um aporte bastante significativo do reservatório de água no solo se comparado a modelagem da escala mensal. Desta forma, sugere-se que na gestão dos recursos hídricos em momentos de recessão as duas escalas sejam utilizadas simultaneamente pelo fato de a escala diária ser mais "conservadora" na contribuição do aquífero raso da bacia para a vazão total.

Além disso, eventos como enxurradas decorrentes de precipitações de elevadas intensidades em curtos tempos de duração não seriam percebidos em passos temporais maiores. Por isso, a escala diária seria mais útil nesta análise, a qual no presente trabalho, teve sua avaliação bastante satisfatória apesar de seu desempenho não ter sido tão positivo se comparado a escala mensal.

Ainda, para longos períodos de recessão, quando a participação do aquífero raso da bacia é bem substancial tem-se a opção da utilização da separação das vazões básicas em ambas as escalas mensais, pois as duas se mostraram satisfatórias e válidas como ferramenta.

Finalmente, tendo em vista os conhecimentos prévios do comportamento hidrológico em função da impermeabilização do solo os quais foram ratificados pelo estudo dos cenários no presente trabalho (principalmente na escala mensal), recomendam-se bastante critério no

momento das expansões das fronteiras agrícolas e avanço das áreas urbanas, pois em função da bacia ser predominantemente composta por solos rasos, tais alterações nos usos das terras trariam impactos bastante negativos ao comportamento hidrológico da bacia em questão.

Além disso, nos locais de terrenos mais acidentados, dispostos nas áreas mais altas da bacia hidrográfica se recomenda a manutenção dos usos originais visando trabalhar também na prevenção dos impactos negativos que mudanças imprudentes trariam.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. 2014. 105 p.

ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV I.; SIBER R.; BOGNER K.; MIELEITNER J.; ZOBRIST J.; SRINIVASAN R. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, 333, 2007. p. 413-430.

ABRÃO, S. F. **Alterações físicas e químicas de um Cambissolo húmico em povoamentos de Pinus taeda L. com diferentes rotações**. UFSM, 2011. 95 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2011.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH S. L. **Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation**. Texas: Texas Water Resources Institute, 2012. 654 p. Disponível em:
<<http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>> Acesso em: 16 abr. 2014.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação Hidrológica SWAT (soil and water assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado em Física e meio ambiente). Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Mato Grosso. 2005. Disponível em:
<http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=35885> Acesso em: 01 jul 2013.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D. & BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, v.58, n.3, p.555-560, jul./set. 2001.

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

BIAN, L. Integrating environmental models and gis in the framework of gis interoperability. 1997. Disponível em: <<http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/interop97/program/papers/bian.html>> Acesso em: 01 jul 2013.

BLOSCHL, G.; GRAYSON, R. **Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modeling**. Cambridge: University Press, 2000.

BRASIL. Lei 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos – SNGRH. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 09 jan. 1997. Seção 1, p. 470.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. São Carlos, 2009. Dissertação (Mestrado) – Escolha de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

DEVANTIER, B. A.; FELDMAN, A. D. Review of gis applications in hydrologic modeling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.119, p.246-60, 1993.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, EMBRAPA, 1999. 412 p

EMBRAPA. Ageitec: Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g798rt3o02wx5ok0wtedt3n5ubswf.html> Acesso em: 11 abr. 2014.

EPAGRI. **Mapas digitais de Santa Catarina**. Florianópolis, 2014. Disponível em: <<http://circam.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

FERREIRA, F. P.; AZEVEDO, A. C. de; DALMOLIN, R. S. D.; GIRELLI, D. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul - Brasil. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 37, n. 2, Mar./Abr. 2007. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782007000200013> Acesso em: 09 abr. 2014.

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. Toledo, Spain. 2011. 27p.

GOODCHILD, M. F. The spatial data infrastructure of environmental modeling. In: GOODCHILD, M. F.; STEYAERT, L. T.; PARKS, B. O.; JOHNSTON, C. A.; MAIDMENT, D. R.; CRANE, M. P., GLENDINNING, S. Ed. **GIS and environmental modeling: progress and research issues**, p.11. 1996.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. (2008). Autocalibration in hydrologic modelling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling & Programa**, v.23, 2008. p.422-434.

GREHS, S. A. **Efeitos da espacialização de propriedades físicas nas respostas hidrológicas da bacia do rio Ibirapuitã**. Porto Alegre, 2003. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

GUERREIRO, M. J.; ABREU, I.; BARROS, M. Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia. **Varição anual e mensal de parâmetros meteorológicos na região do Algarve, Portugal**. 40- 49, 2005. Disponível em: <<http://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/570/1/40-50FCT2005-3.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.; BECKER, A. "Development and test of aspatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds". **Ecological Modelling**, 106, 1998. p. 261 – 289.

LELIS, T. A. et al. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. **Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil**. Minas Gerais – Viçosa, vol.36, n.2, p. 623-634, março/abril 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832012000200031&script=sci_arttext>. Acesso em: 01 jul 2013.

LUBITZ, E. **Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à bacia do Ribeirão Concórdia - Lontras, SC**. 2009. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2009.

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

MAMILLAPALLI, S.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; ENGEL, B. A. Effect of spatial variability on basin scale modeling. (em CD-ROM) In: INTERNATIONAL CONFERENCE/WORKSHOP ON INTEGRATING GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, 3., Santa Fe, 1996. Disponível em: <http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/mamillapalli_sudhakar/my_paper.html l> Acesso em: 01 jul 2013.

MARCON, I. R. **Modelagem e cenários hidrológicos em bacia representativa da Mata atlântica no sul do Brasil**. 2013. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MEDEIROS, P. S. C. de; NASCIMENTO, P. C. do; INDA, A. V.; SILVA, D. S. da. Caracterização e classificação de solos graníticos em

toposequência na região sul do Brasil. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 43, n. 7, Jul. 2013. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782013000700011&script=sci_arttext> Acesso em: 16 nov. 2014.

MEIRA NETO, A. A.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semi-árido. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió – AL, Brasil, 2011, 15 p.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas I: conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p.21-44, 1997.

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

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

MULLIGAN, M. & WAINWRIGHT, J. **Environmental modeling: finding simplicity in complexity**. London: Wiley & Sons. 430 p. 2004.

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

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool theoretical documentation**: Version 2005. Agricultural Research Service / Texas Agricultural Experiment Station, Texas, E.U.A., 2005.

OLIVEIRA, M. Q. C. **Impacto de mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do tio Joanes e sua repercussão na zona costeira**. 1999. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.

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

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

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia – fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Ed. Agropecuária. 2002. 478p.

PINTO, N. M. ; BARBOSA JÚNIOR, A. R. **A importância de uma boa gestão dos recursos hídricos para a cidade do Rio de Janeiro.** RGSA: Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 4, p. 86-95, 2010.

POOCH, U. W.; WALL, J. A. **Discrete event simulation: a practical approach.** Boca Raton, Florida, CRC Press, 1993. (Computer Engineering Series)

PRADO, H. do. **Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais.** 4ª Ed. Piracicaba: Publicação Independente, 2013. 284 p.

SÁ, E. A. S. **Estudo do modelo TOPMODEL na bacia hidrográfica do Alto Canoas – SC.** 2014. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

SANTA CATARINA. **Lei n. 10.949**, de 09 de novembro de 1998. Dispõe sobre a caracterização do Estado em 10 (dez) Regiões Hidrográficas.

SANTA CATARINA (Estado). Secretaria de Estado da Agricultura e Desenvolvimento Rural. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Sustentável. Programa de Recuperação Ambiental e de Apoio ao Pequeno Produtor Rural. Estudo dos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos para o Estado de Santa Catarina e Apoio para sua Implantação – Panorama dos Recursos Hídricos em Santa Catarina. Santa Catarina, maio de 2006. 315p.

SANTOS, L. L. dos. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 01-19, 2009.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para milho e aveia em rotação com outras culturas em três sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.545-552, 2002.

SERGIO, D. Z.; FRANCO, D.; GARBOSSA, L. H. P. Hydrological modeling of Cubatão do Sul catchment using the SWAT model soil and water assessment tool. In: INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE AND WORKSHOPS, 2014, Pernambuco, Brazil. Anais... Pernambuco: Texas A&M Agrilife reserach, 2014. p. 1-8.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M.; AVANZI, J. C.; Ferreira, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.1223-1230, 2005.

SILVEIRA A. L. da; LOUZADA J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento de água no solo. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 2007. p. 335-372. 943p.

TAYLOR, K.; WALKER, G.; ABEL, D. A framework for model integration in spatial decision support systems. **International Journal of Geographical Information Sciences**, v.13, p.533-55, 1999.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 1993. 952p.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 2007. 943p.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W.; ANDREOLLI, I.; REGINA, J. V. M. Previsão de vazão afluente ao reservatório de Machadinho utilizando previsão de chuva. p. 431-439. In: II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL), Salvador, BA: 2003. **Anais**.

USGS – United States Geological Survey. Disponível em:
<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>. Acesso em: 16
nov. 2014.

WILLIAMS, J. R. The EPIC model. In: **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch, Co: Water Resources Publications, Cap. 25, p. 909-1000, 1995.