



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA**



---

**Thawara Giovanna Souza da Fonseca Guidolin**

**AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE AQUECIMENTO,  
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT NA  
BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TABOÃO (RS)**

Porto Alegre  
Janeiro de 2020

**Thawara Giovanna Souza da Fonseca Guidolin**

**AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE AQUECIMENTO,  
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT NA  
BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TABOÃO (RS)**

Trabalho de conclusão apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira Hídrica.

**Orientador: Gean Paulo Michel**

Porto Alegre  
Janeiro de 2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Souza da Fonseca Guidolin, Thawara Giovanna  
Avaliação do período de aquecimento, calibração e  
validação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do  
arroio Taboão (RS) / Thawara Giovanna Souza da Fonseca  
Guidolin. -- 2020.  
103 f.  
Orientador: Gean Paulo Michel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,  
Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Modelagem hidrossedimentológica. 2. Período de  
aquecimento. 3. Modelo SWAT. I. Paulo Michel, Gean,  
orient. II. Título.

Thawara Giovanna Souza da Fonseca Guidolin

AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE AQUECIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO  
MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TABOÃO (RS)

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 18/12/2019 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Gean Paulo Michel  
Orientador

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan- Departamento de Obras Hidráulicas

.....  
Prof.<sup>a</sup> MSc. Franciele Zanandrea – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia

.....  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Nilza Maria dos Reis Castro – Departamento de Obras Hidráulicas

## RESUMO

**GUIDOLIN, T.G.S.F. Avaliação do período de aquecimento, calibração e validação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do arroio Taboão (RS).** 2020. 92 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Com o passar dos anos a ação do ser humano sobre o meio ambiente vem modificando muitos processos naturais, principalmente os que envolvem a deterioração dos solos por erosão. A modelagem hidrossedimentológica apresenta-se como uma ferramenta para avaliar não apenas a perda de solos como também a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas. Entretanto, as séries históricas de vazão e, principalmente de sedimentos são extremamente limitadas, o que indica a importância da utilização de todos os períodos com dados disponíveis nas etapas essenciais da simulação – a calibração dos parâmetros do modelo e a verificação dos resultados simulados em relação aos observados. Assim, o objetivo deste trabalho foi de avaliar a influência do período de aquecimento sobre as etapas de calibração e validação do modelo SWAT na bacia do Taboão. Obtiveram-se resultados satisfatórios para ambas as etapas, tanto na simulação hidrológica quanto na sedimentológica, considerando os coeficientes de desempenho de Nash-Sutcliffe e Porcentagem bias. Na análise do período de aquecimento do modelo, verificou-se um aumento das métricas de desempenho para a etapa de validação do modelo hidrológico, para os dois cenários simulados (com 1 ano de aquecimento e sem aquecimento do modelo) em relação ao cenário comparativo, com 2 anos de aquecimento. O melhor desempenho da simulação hidrológica foi observado na etapa de validação para o cenário com 1 ano de período de aquecimento, resultando em NSE de 0,70 e PBIAS de 0,68%, considerando um passo de tempo mensal.

Palavras-chave: modelagem hidrossedimentológica; período de aquecimento; modelo SWAT.

## **ABSTRACT**

**GUIDOLIN, T.G.S.F. Warm-up period analysis, calibration and validation of SWAT model for the Taboão basin (RS).** 2020. 92 p. Monograph (Engineering of Water Resources) – Hydraulic Research Institute. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Over the years, the human action on the environment has been modifying many natural processes, especially that involve soil deterioration by erosion. Hydrosedimentological modeling presents as a tool to evaluate not only soil loss as also sediment yield in watersheds. However, the historical flow series and mainly sediments are extremely reduced, which indicates the importance to use all periods with available data in the essential stages of simulation – calibration of model parameters and verification of simulated results in relation to observed data. Thus, the purpose of this work was to evaluate the warm-up influence over calibration and validation steps of the SWAT model on the Taboao basin. Satisfactory results were obtained in both stages, for the hydrological and sedimentological simulation, considering Nash-Sutcliffe and percent bias performance coefficient. In the warm-up period analysis, there was an increase in performance metrics for the validation step of the hydrological model, for both simulated scenarios (with 1-year warm-up and without warm-up model) in relation to the comparative scenario, with 2 years warm-up. The best hydrological simulation performance was observed on the validation step for 1-year warm-up scenario, result in NSE of 0.70 and PBIAS of 0.68%, considering a monthly time step.

Key words: Hydrosedimentological modeling; warm-up; SWAT model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de processos erosivos e deposicionais que ocorrem em uma bacia hidrográfica.....	14
Figura 2. Representação esquemática dos diferentes tipos de pico de concentração de sedimentos em relação a vazão.....	16
Figura 3. Processos hidrossedimentológicos e sua zona de ocorrência na bacia hidrográfica.	17
Figura 4. Amostrador de sedimentos em suspensão US DH-48. ....	22
Figura 5. Amostradores de sedimento de leito Helley-Smith (a) e Arnhem (b).....	24
Figura 6. Exemplo de curva chave de sedimentos ajustada. ....	25
Figura 7. Exemplo de curva granulométrica de material em suspensão e material do leito. ...	27
Figura 8. Metodologias disponíveis na fase terrestre (vertentes) do modelo SWAT.....	37
Figura 9. Metodologias disponíveis na fase aquática (canais) do modelo SWAT.....	37
Figura 10. Localização geral da área de estudo.....	39
Figura 11. Altimetria da bacia hidrográfica do arroio Taboão. ....	41
Figura 12. Declividade da bacia hidrográfica do arroio Taboão. ....	42
Figura 13. Pedologia da bacia hidrográfica do arroio Taboão. ....	44
Figura 14. Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do arroio Taboão. ....	46
Figura 15. Localização dos pontos de monitoramento na bacia do arroio Taboão. ....	47
Figura 16. Bacia, sub-bacias, rede de drenagem e pontos de controle gerados para a simulação com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do arroio Taboão.....	51
Figura 17. Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) geradas para a simulação com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do arroio Taboão.....	52
Figura 18. Hidrograma simulado em relação ao hidrograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal.....	67

Figura 19. Correlação entre a vazão simulada e observada no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal e 2 anos de período de aquecimento. ....	69
Figura 20. Sedimentograma simulado em relação ao sedimentograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal. ....	75
Figura 21. Hidrograma e sedimentograma simulados para o exutório da bacia do arroio Taboão, em simulação com passo de tempo mensal. ....	77
Figura 22. Correlação entre a produção de sedimentos simulada e observada no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal. ....	78
Figura 23. Correlação da produção de sedimentos com a vazão para os dados observados na bacia e os valores simulados pelo modelo. ....	79
Figura 24. Hidrograma simulado em relação ao hidrograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal e período de aquecimento de 1 ano. ....	81
Figura 25. Hidrograma simulado em relação ao hidrograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal e sem aquecimento do modelo. .	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação granulométrica dos sedimentos. ....	28
Tabela 2. Classes de relevo na bacia hidrográfica do arroio Taboão. ....	43
Tabela 3. Uso do solo na bacia hidrográfica do arroio Taboão. ....	45
Tabela 4. Dados mensais relativos à precipitação requeridos pelo modelo SWAT. ....	48
Tabela 5. Dados mensais relativos à temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, requerido pelo modelo SWAT. ....	48
Tabela 6. Algumas das características físicas dos solos da bacia do arroio Taboão inseridas no modelo SWAT. ....	53
Tabela 7. Valores das métricas estatísticas consideradas e seus respectivos índices de desempenho para simulações com passo de tempo mensal. ....	58
Tabela 8. Períodos utilizados para simulação com o modelo SWAT na bacia do Taboão e respectivos cenários considerados. ....	59
Tabela 9. Parâmetros e seus respectivos valores calibrados para a simulação do módulo hidrológico do modelo SWAT, considerando passo de tempo mensal. ....	63
Tabela 10. Métricas de desempenho obtidas para a calibração mensal do módulo hidrológico do modelo SWAT, utilizando 2 anos de período de aquecimento. ....	64
Tabela 11. Parâmetros e seus respectivos valores calibrados para a simulação do módulo sedimentológico do modelo SWAT, considerando passo de tempo mensal. ....	71
Tabela 12. Métricas de desempenho obtidas para a calibração mensal do módulo sedimentológico do modelo SWAT. ....	72
Tabela 13. Métricas de desempenho obtidas para a calibração e validação mensal do módulo hidrológico do modelo SWAT, utilizando 1 ano de período de aquecimento. ....	80
Tabela 14. Métricas de desempenho obtidas para a calibração e validação mensal do módulo hidrológico do modelo SWAT, não utilizando período de aquecimento. ....	82

Tabela 15. Resumo das métricas de desempenho obtidas para todos os cenários de calibração e validação do modelo SWAT na bacia do arroio Taboão, em simulação com passo de tempo mensal.....	84
---	----

## LISTA DE SIGLAS

ADJ\_PKR: fator de ajuste da taxa de pico de sedimentos para o módulo terrestre

AGRL: terras agrícolas genéricas

AGU: *American Geophysical Union*

ALMANAC: modelo *Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment Criteria*

ALPHA\_BF: fator alfa do fluxo de base (dias<sup>-1</sup>)

ANA: Agência Nacional de Águas

ANION\_EXCL: fração de porosidade do solo

CANMX: armazenamento máximo da copa das árvores (mm H<sub>2</sub>O)

CH\_BED\_BD: densidade aparente do sedimento no leito do canal (g.cc<sup>-1</sup>)

CH\_BED\_KD: erodibilidade do leito do canal por jato de teste (cm<sup>3</sup>.(N.s)<sup>-1</sup>)

CH\_BED\_TC: tensão crítica de cisalhamento do leito do canal (N.m<sup>-2</sup>)

CH\_BNK\_BD: densidade aparente do sedimento nas margens do canal (g.cc<sup>-1</sup>)

CH\_BNK\_KD: erodibilidade das margens do canal por jato de teste (cm<sup>3</sup>.(N.s)<sup>-1</sup>)

CH\_BNK\_TC: tensão crítica de cisalhamento das margens do canal (N.m<sup>-2</sup>)

CH\_COV1: fator de cobertura do canal

CH\_COV2: fator de erodibilidade do canal

CH\_ERODMO: fator de erodibilidade do canal em cada um dos meses do ano

CH\_N1: coeficiente “n” de Manning para os canais tributários

CH\_N2: coeficiente “n” de Manning para os canais principais

CLAY: teor de argila da camada de solo (%)

COMGRAD-HID: Comissão de Graduação em Engenharia Hídrica

CPRM: Serviço Geológico do Brasil

DEWPT: ponto de orvalho média em cada um dos meses do ano (°C)

EPCO: fator de compensação do crescimento das plantas

EPIC: modelo *Erosion Productivity Impact Calculator*

ESCO: fator de compensação da evaporação de água do solo

FRST: floresta

GLEAMS: modelo *Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*

GW\_DELAY: atraso das águas subterrâneas (dias)

GW\_REVAP: coeficiente de movimento das águas subterrâneas

GWQMN: limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra fluxo de base (mm H<sub>2</sub>O)

GX: Gleissolo Háplico

HYDGRP: grupo hidrológico do solo

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LANDSAT: satélite *Land Remote Sensing Satellite*

LAT\_SED: concentração de sedimentos no fluxo lateral e subterrâneo (mg.L<sup>-1</sup>)

LAT\_TTIME: tempo necessário para o retorno do fluxo lateral (dias)

LVd1: Latossolo Vermelho Distrófico 1

LVd2: Latossolo Vermelho Distrófico 2

LVdf1: Latossolo Vermelho Distroférico 1

LVdf2: Latossolo Vermelho Distroférico 2

LVdf3: Latossolo Vermelho Distroférico 3

MUSLE: *Modified Universal Soil Loss Equation*

NLAYERS: número de camadas no perfil de solo

NTU: Unidade Nefelométrica de Turbidez

NVef: Nitossolo Vermelho Eutroférico

NYSKIP: número de anos para não gravar os resultados simulados (período de aquecimento)

PAST: pastagem

PCPD: número médio de dias com precipitação em cada um dos doze meses do ano (dias)

PCPMM: média da precipitação em cada um dos doze meses do ano (mm.dia<sup>-1</sup>)

PCPSKW: coeficiente de assimetria da precipitação diária em cada um dos doze meses do ano

PCPSTD: desvio padrão da precipitação diária em cada um dos doze meses do ano (mm.dia<sup>-1</sup>)

PR\_W1: probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia seco em cada um dos meses do ano

PR\_W2: probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso em cada um dos meses do ano

PRF: fator de ajuste da taxa de pico de sedimentos para o módulo aquático

QUAL2E: modelo QUAL2E

RAINHHMX: chuva máxima com duração de 30 min em cada um dos doze meses do ano (mm)

RCHRG\_DP: fração de percolação para o aquífero profundo

REVAPMN: limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação para o aquífero profundo (mm H<sub>2</sub>O)

RHN: Rede Hidrometeorológica Nacional

RLe: Neossolo Litólico Eutrófico

ROCK: teor de rocha da camada de solo (%)

RS: Rio Grande do Sul

RSDIN: cobertura inicial de resíduos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

RYbe: Neossolo Flúvico Tb Eutrófico

SAND: teor de areia da camada de solo (%)

SCS: *Soil Conservation Service*

SDR: *Sediment Delivery Ratio*

SHALLST: profundidade inicial da água no aquífero raso ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SILT: teor de silte da camada de solo (%)

SLSOIL: comprimento do declive para que ocorra fluxo lateral (m)

SOL\_ALB: albedo da camada de solo

SOL\_AWC: quantidade de água disponível na camada de solo ( $\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$ )

SOL\_BD: massa específica da camada de solo ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

SOL\_CBN: teor de carbono orgânico na camada de solo (%)

SOL\_K: condutividade hidráulica saturada da camada de solo ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )

SOL\_Z: profundidade da camada de solo (mm)

SOL\_ZMX: profundidade máxima das raízes no perfil de solo (mm)

SOLARAV: radiação solar média diária em cada um dos meses do ano ( $\text{MJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{dia})^{-1}$ )

SOY: soja

SPCON: parâmetro linear de reentrada de sedimentos no canal

SPEXP: parâmetro exponencial de reentrada de sedimentos no canal

SUFI-2: *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm*

SURLAG: coeficiente de atraso do escoamento superficial (dias)

SWAT: *Soil and Water Assessment Tool*

SWAT-CUP: *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures*

TMPMN: temperatura média mínima do ar em cada um dos meses do ano (°C)

TMPMX: temperatura média máxima do ar em cada um dos meses do ano (°C)

TMPSTDMN: desvio padrão da temperatura mínima do ar em cada um dos meses do ano (°C)

TMPSTDMX: desvio padrão da temperatura máxima do ar em cada um dos meses do ano (°C)

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

URH: Unidade de Resposta Hidrológica

URHD: residencial de alta densidade

URLD: residencial de alta densidade

USGS: *United States Geological Survey*

USLE: *Universal Soil Loss Equation*

USLE\_K: fator de erodibilidade do solo (K) da equação USLE

UTRN: transporte

WATR: água

WHEAT: trigo

WNDV: velocidade do vento média em cada um dos meses do ano ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

WXGEN: modelo WXGEN

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha, \beta$  = coeficientes de ajuste da MUSLE

A = perda de solos calculada através da USLE

C = fator de cultivo do solo

CSS = concentração de sólidos em suspensão

K = fator de erodibilidade do solo

$K_t$  = turbidez específica

L = fator topográfico de comprimento do declive

N = nível d'água

P = fator de práticas conservacionistas

Q = vazão

$Q_e$  = volume de escoamento gerado em um evento de chuva

$Q_p$  = vazão de pico de um evento de chuva

$Q_{st}$  = descarga sólida total

R = fator de erosividade da chuva

S = fator topográfico de gradiente de declividades

$S_p$  = produção de sedimentos calculada através da MUSLE

T = turbidez em NTU

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
3.1 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA HIDROSEDIMENTOLOGIA .....	11
3.2 PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS ...	12
<b>3.2.1. O ciclo hidrológico e dos sedimentos .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2.2. Fatores que influenciam na erosão .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.3. O efeito dos processos erosivos e a produção de sedimentos.....</b>	<b>19</b>
3.3 MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO .....	21
<b>3.3.1. Carga dissolvida .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.2. Carga em suspensão .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.3. Carga do leito (arraste e saltação) .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.4. A curva-chave de sedimentos .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.5. Concentração de sedimentos em suspensão e sua relação com a turbidez .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.6. Curva granulométrica dos sedimentos.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.7. Importância do monitoramento hidrossedimentológico.....</b>	<b>28</b>
3.4 MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA.....	29
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
4.1 O MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL).....	32
4.2 ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TABOÃO .....	38
<b>4.2.1. Clima e hidrografia .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2. Altimetria e declividades .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.3. Pedologia .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.4. Uso e ocupação do solo.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.5. Banco de dados utilizado .....</b>	<b>47</b>
4.3 SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA COM O MODELO SWAT .....	50
<b>4.3.1. Aquecimento do modelo SWAT.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.2. Calibração e validação do modelo SWAT.....</b>	<b>56</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
5.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA .....	61

5.2 SIMULAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA.....	69
5.3 ANÁLISE DO PERÍODO DE AQUECIMENTO DO MODELO .....	79
<b>5.3.1. Cenário de simulação com 1 ano de período de aquecimento.....</b>	<b>80</b>
<b>5.3.2. Cenário de simulação sem aquecimento do modelo.....</b>	<b>82</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>85</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a ação antrópica sobre o meio ambiente, principalmente recursos hídricos e solo, vem se intensificando, culminando na modificação das paisagens naturais e em uma série de consequências ambientais, muitas delas de caráter irreversível. Algumas destas implicações dizem respeito à deterioração dos solos por processos erosivos, o que gera efeitos não apenas em escala local como também em escala regional, visto que após os sedimentos adentrarem na rede de drenagem, podem propagar-se ao longo de toda a bacia hidrográfica (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1986).

A modelagem hidrossedimentológica surge como uma ferramenta para prever, estudar e analisar cenários não só sobre a perda de solos como também a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas, de forma a auxiliar na avaliação dos impactos causados e na proposição de alternativas de planejamento, que auxiliem para uma gestão adequada nas bacias (SOUZA et al., 2009). A base de uma modelagem adequada reside na disponibilidade de dados de monitoramento, que são essenciais para a verificação da qualidade da modelagem quanto à correta representação dos processos físicos atuantes na bacia (MERRITT et al., 2003). Entretanto, as séries de dados disponíveis relacionadas a sedimentologia no Brasil são extremamente limitadas, e muitas vezes não representam dados relacionados aos períodos no qual os sedimentos são produzidos e transportados, ou seja, as épocas de cheias (SARI, 2017). Segundo dados da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), que funciona em uma parceria entre a Agência Nacional de Águas (ANA), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e entidades privadas, ao todo no país existem 9.656 estações fluviométricas em operação, e apenas 1.744 estações sedimentométricas (ANA, 2019). Além do pequeno número de estações de monitoramento, dada a abrangência continental do país, os dados disponíveis normalmente são de medições pontuais, realizadas em campanhas de amostragem. Dados contínuos geralmente são obtidos apenas através de monitoramentos independentes, como de grupos de pesquisa em universidades.

Modelos de simulação contínua, que são capazes de representar os fenômenos ao longo do tempo, necessitam de um período de aquecimento (*warm-up*), justificado pelas grandes incertezas relacionadas às condições iniciais da modelagem, como por exemplo a definição da umidade inicial do solo. Este período é utilizado para que, no início da simulação, as variáveis

estejam livres das influências impostas pelas condições iniciais inseridas no modelo (PEREIRA, 2013), sendo os resultados gerados, ao longo do período de aquecimento, descartados da simulação nas etapas posteriores de calibração e validação.

Este período de aquecimento é função de algumas variáveis referentes a área simulada, como: a capacidade de armazenamento (do solo, aquífero, vegetação, etc.) da bacia hidrográfica em estudo; do volume armazenado nos canais que formam a rede de drenagem; da existência, ou não, de planícies de inundação; das dimensões da bacia; das condições hidrológicas da área de estudo quando o modelo foi iniciado; e, entre outros, dos parâmetros adotados no início da simulação. Além disso, a influência das condições supracitadas na qualidade dos resultados gerados no início da simulação também possui relação com o tempo de concentração da bacia.

Para a aplicação do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) sugere-se a utilização de, no mínimo, dois anos de série de dados para utilização como período de aquecimento, para que as condições iniciais da modelagem sejam estabilizadas e a simulação gere resultados satisfatórios (NEITSCH et al., 2009). Este valor é uma sugestão apresentada no manual e pode ser ainda maior, caso o modelo não consiga representar de forma adequada as respostas da bacia na etapa subsequente da simulação, a calibração.

Em muitas bacias hidrográficas brasileiras, as séries de monitoramento sedimentológico disponíveis são menos extensas do que dois anos, o que dificulta a aplicação e utilização do modelo, visto que não haveria dados disponíveis a serem utilizados para validar os resultados simulados. Desta forma, a motivação para o desenvolvimento do presente trabalho surge da perspectiva de avaliar se a utilização de menores períodos de aquecimento do modelo SWAT ainda pode fornecer resultados satisfatórios para a bacia hidrográfica do arroio Taboão. Se possível, isto daria indícios de que é praticável diminuir a extensão de série temporal necessária para a aplicação do modelo em bacias com áreas de drenagem semelhantes a utilizada neste estudo, o que poderia aumentar a aplicabilidade do modelo SWAT para localidades que não possuem séries longas de dados.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

A finalidade do presente trabalho é avaliar a influência do período de aquecimento sobre as etapas de calibração e validação do modelo SWAT, analisando posteriormente sua influência na qualidade dos resultados simulados. A bacia hidrográfica escolhida para a realização deste estudo é a do arroio Taboão, com área de drenagem de aproximadamente 78 km<sup>2</sup>, localizada no município de Pejuçara (RS).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir do objetivo geral do trabalho, são propostos:

- Calibrar e validar o modelo hidrossedimentológico SWAT para a bacia hidrográfica em estudo, utilizando período de aquecimento de 2 anos, conforme recomendado pelo manual do modelo;
- Diminuir a extensão temporal da série de dados utilizada para aquecimento do modelo, incluindo os anos excedentes na etapa de validação do modelo hidrológico; e
- Avaliar o desempenho da simulação frente aos cenários de aquecimento utilizados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA HIDROSEDIMENTOLOGIA

Com a expansão da ocupação humana ocorrendo em bacias hidrográficas, alterações antrópicas são observadas no meio ambiente de forma mais recorrente, causando impactos no regime hidrossedimentológico. Alguns exemplos destas mudanças são os barramentos em cursos d'água, modificações no uso e manejo dos solos, poluição, remoção de cobertura vegetal, entre outros. Segundo Carvalho (2008), os problemas criados pelos sedimentos estão presentes nas diversas fases do ciclo hidrossedimentológico, causando remoção da camada de solo fértil, degradação da qualidade da água, assoreamento de reservatórios e de canais. Em contraponto, benefícios derivados da utilização dos sedimentos para o homem englobam a mineração, a redução da ação erosiva da água no escoamento de rios e auxiliam na condução de matéria orgânica, contribuindo para manutenção da fauna aquática (CARVALHO, 2008).

Processos sedimentológicos podem responder à ação humana não controlada de forma radical e em uma escala de tempo bem menor do que os processos hidrológicos (CARVALHO, 2008), por isso torna-se evidente a necessidade de estudos que auxiliem na compreensão da dinâmica dos recursos hídricos de forma conjunta. Atualmente se estuda de forma mais intensa os prejuízos físicos e econômicos da erosão hídrica, porém desponta uma nova demanda social, econômica e ambiental que é o enfoque integrado dos processos hidrológicos, erosivos e agronômicos (MINELLA, 2003).

Desta forma, a modelagem surge como uma ferramenta capaz de auxiliar na compreensão dos processos de erosão do solo nas vertentes e o transporte do sedimento através da rede de drenagem, permitindo uma análise mais completa do fenômeno devido à inter-relação entre os processos que ocorrem na bacia (BUARQUE, 2015). Além disto, esta ferramenta também permite o prognóstico de diversos cenários, onde busca-se avaliar, entre outros aspectos, a influência das modificações no meio ambiente e seus impactos nos sistemas naturais.

## 3.2 PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

### 3.2.1. O ciclo hidrológico e dos sedimentos

O ciclo hidrológico é o fenômeno de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, podendo este ser fechado – a nível global – ou aberto, visto que os volumes evaporados em uma dada região não precipitam necessariamente no mesmo local (SILVEIRA, 2009). A água que circula e mantém o ciclo desloca-se tanto no estado líquido como no gasoso, e este movimento é impulsionado essencialmente pela energia solar, que aquece o ar, o solo e a água superficial, associada à gravidade e a rotação da terra (COLLISCHOON & DORNELLES, 2013).

De forma geral, o ciclo hidrológico pode começar a ser descrito pelo vapor de água presente na atmosfera, oriundo dos processos de evaporação e transpiração na superfície terrestre. A transpiração é a parcela de água absorvida pelas raízes das plantas e liberada novamente para a atmosfera, enquanto a evaporação é a transferência de vapor a partir de superfícies líquidas, como lagos e rios. A evapotranspiração, que é a junção de ambos os processos, depende da incidência de radiação solar, das tensões de vapor do ar e do regime de ventos (COLLISCHOON & DORNELLES, 2013; SILVEIRA, 2009).

Sob determinadas condições meteorológicas, o vapor presente na atmosfera condensa, agrupa-se em microgotículas e então precipita, na forma de chuva ou neve (SILVEIRA, 2009). Do total de volume precipitado, uma parcela é interceptada pelas plantas e a outra atinge o solo; desta última fração, há infiltração da água que atinge o solo, visto que este é um meio poroso. Ao infiltrar a água beneficia as raízes das plantas, e ao percolar ao longo do perfil de solo alimenta os corpos d'água superficiais e também os aquíferos.

Quando o solo recebe uma intensidade de precipitação maior do que sua capacidade de infiltração, a água já não consegue mais penetrar através dos poros e fica retida na superfície. Se a precipitação continua e a área possui alguma declividade, a água retida superficialmente começa a escoar (COLLISCHOON & DORNELLES, 2013). O escoamento superficial é impulsionado pela força da gravidade para as regiões do terreno de menor altitude, com a vegetação na superfície do solo servindo como um obstáculo para o processo, tendendo a

diminuir a energia cinética da água e, conseqüentemente, o potencial erosivo do escoamento (SILVEIRA, 2009).

O ciclo dos sedimentos engloba os processos de desagregação, transporte e deposição de partículas sólidas. Estes são processos naturais, observados ao longo de toda a escala de tempo geológico, sendo os responsáveis por moldar a paisagem atual do globo (JULIEN, 1998). O ciclo sedimentológico é fechado em escala global e em larga escala temporal, e se desenvolve no sentido de montante para jusante.

Segundo Bordas & Semmelmann (2009), a erosão é o processo de destacamento das partículas da superfície do solo e/ou dos leitos e margens de canais aluviais sob ação do escoamento superficial. Esse deslocamento se dá no local de origem das partículas, quando as forças hidrodinâmicas exercidas sobre as mesmas superam a resistência por ela oferecida.

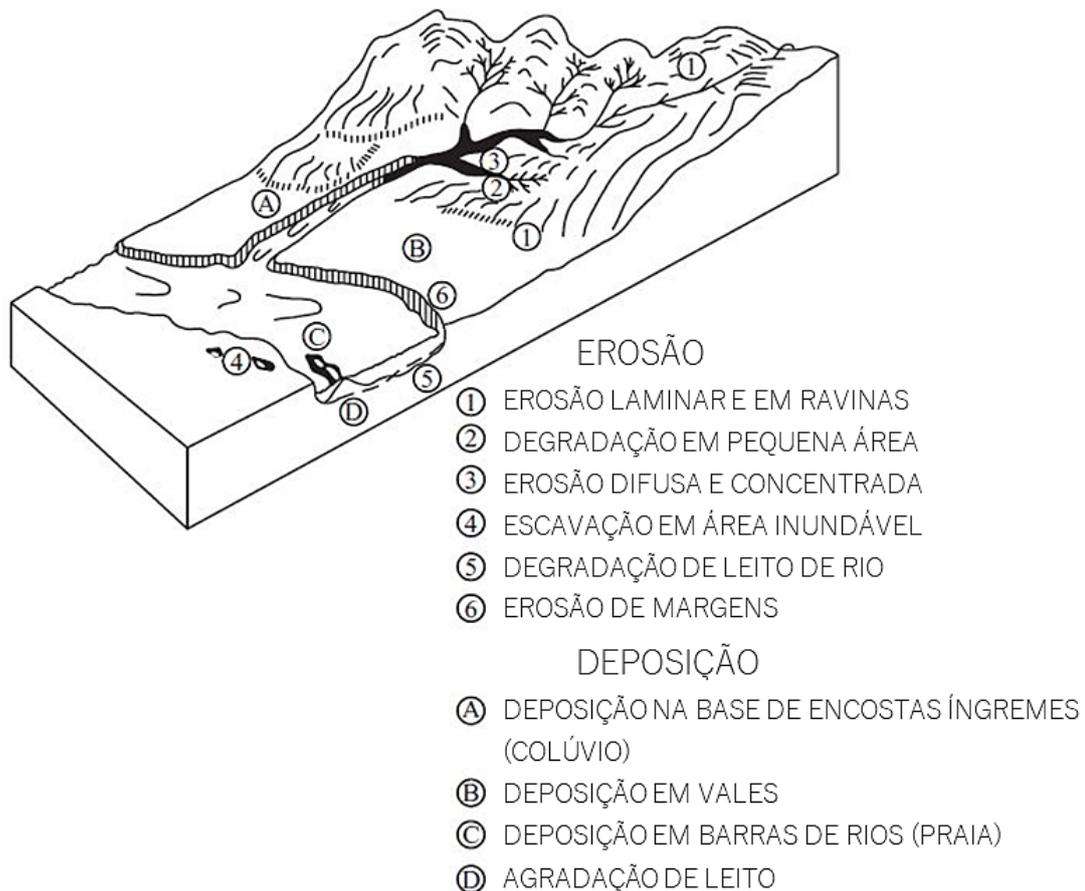
Há duas formas de erosão dos solos: erosão geológica, aquela processada de forma natural e que atua paulatinamente sobre o meio, e a erosão acelerada ou antrópica, aquela causada pela ação humana. São nove os agentes ativos da erosão: água, temperatura, insolação, vento, gelo, neve, ação de microrganismos, ação de animais e ação humana. Aqui abordaremos apenas os tipos de erosão hídrica, elencados conforme abaixo (CARVALHO, 2008) e exemplificados na Figura 1:

- Erosão fluvial: se processa de modo constante e natural, graças à ação das correntes dos rios, e é a grande responsável pelas mudanças morfológicas nos canais naturais. Pode ser subdividida em erosão de leito e de margem, sendo o material erodido chamado de aluvião;
- Erosão hídrica superficial: uma das formas de ocorrência é através da erosão *pluvial*, causada pelo impacto das gotas de chuva ao caírem sobre o solo desprotegido. A erosão também pode se dar de forma *laminar*, situação que ocorre quando o solo já está saturado e sob intensa precipitação, havendo um desgaste suave e uniforme da camada superficial em toda sua extensão. Além disso, também pode ocorrer a erosão por *escoamento difuso* (erosão *em sulcos*), caracterizada pelo escoamento concentrado em pequenos canais distribuídos, formando um agente de transporte do material já desagregado pela chuva; quando este fenômeno é observado em maior escala, é

chamado de erosão por *escoamento difuso intenso*. Por fim, a erosão por *escoamento concentrado* sucede-se devido à falta de estrutura do solo, permitindo deslizamentos e formando voçorocas;

- Erosão por remoção de massa: ocorre quando o terreno está saturado e sob influência da gravidade, perdendo então a coesão interna, o que possibilita sua deformação;
- Erosão devido a eventos extremos: podem ser ocasionados por enchentes, terremotos, tornados e tormentas, ocasionando intensos processos erosivos ou predispondo o solo ao desgaste.

Figura 1. Tipos de processos erosivos e deposicionais que ocorrem em uma bacia hidrográfica.



(Fonte: adaptado de VANONI, 1997, p.437.)

Segundo classificação de Bordas & Semmelmann (2009) e Petts & Amoros (1996), o transporte do material sólido pelo escoamento divide-se em descarga sólida de fundo (ou de arraste) e descarga sólida em suspensão. A primeira parcela é composta por partículas mais

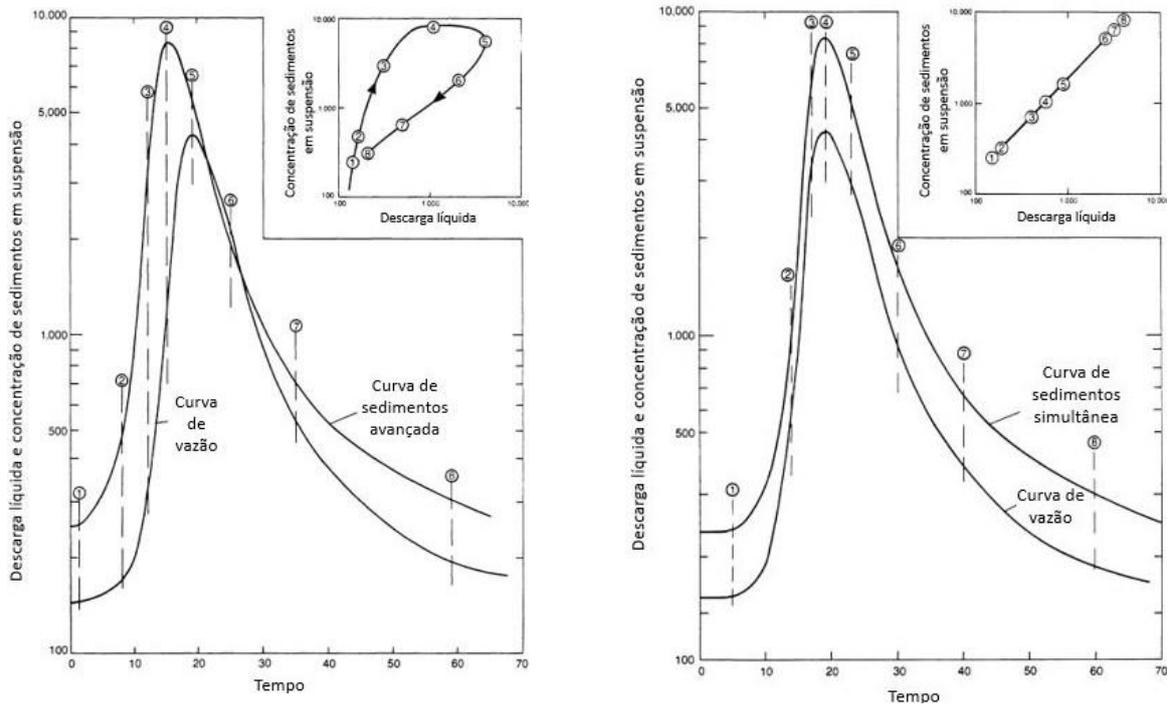
pesadas, que se deslocam por rolamento, deslizamento e, eventualmente, saltação. Já a parcela transportada em suspensão na coluna de água é composta por partículas mais leves, oriundas da bacia hidrográfica ou da erosão no próprio canal.

Entretanto, Subcommittee on Sedimentation (1963) propõe a seguinte classificação em relação ao transporte de material sólido:

- Carga de arraste: é o sedimento que rola ou desliza no leito do curso d'água. Durante praticamente todo o tempo, as partículas transportadas estão em contato com o leito;
- Carga de saltação: é o sedimento que salta ao longo do leito devido ao efeito do escoamento ou do impacto de outras partículas. O impulso inicial necessário para o início do transporte por saltação das partículas pode ser o impacto de uma na outra, o rolamento de uma sobre a outra ou o próprio fluxo líquido sobre a superfície curva de uma partícula, que acaba por gerar pressões negativas;
- Carga em suspensão: é o conjunto de partículas sustentadas devido às componentes verticais das velocidades em regime turbulento, enquanto são carreadas ao longo do canal pelas componentes horizontais destas velocidades. As partículas que são pequenas o suficiente para estarem suspensas deslocam-se para cima e para baixo no fluxo e, presumivelmente, transitam para dentro e para fora da camada do leito.

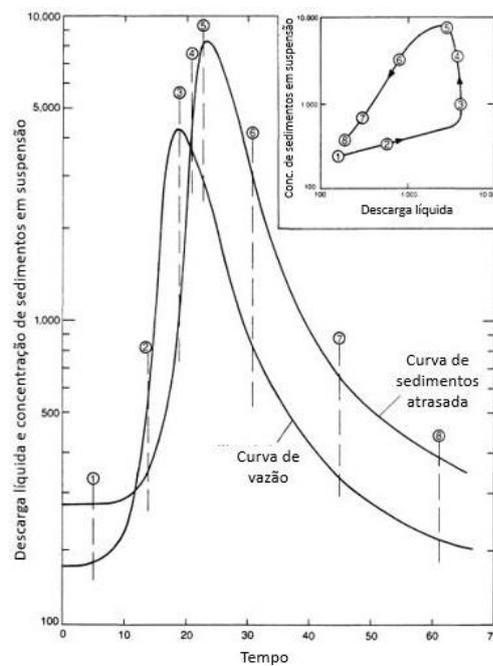
Os principais responsáveis pelo transporte de sedimentos nos cursos d'água são as precipitações e o escoamento superficial, que desagregam os solos e os transportam até os cursos d'água. Essa descarga sólida em transporte pode se comportar de três formas diferentes em relação à descarga líquida: o pico da carga sólida ocorre antes do pico da vazão, ambas se igualam no movimento ou o pico sólido segue à frente do pico líquido (CARVALHO, 2008). Este efeito de histerese entre os diferentes tipos de descarga pode ser visualizado graficamente através da Figura 2.

Figura 2. Representação esquemática dos diferentes tipos de pico de concentração de sedimentos em relação a vazão.



(a) Ocorrência da descarga sólida avançada em relação a vazão.

(b) Ocorrência da descarga sólida simultânea em relação a vazão.



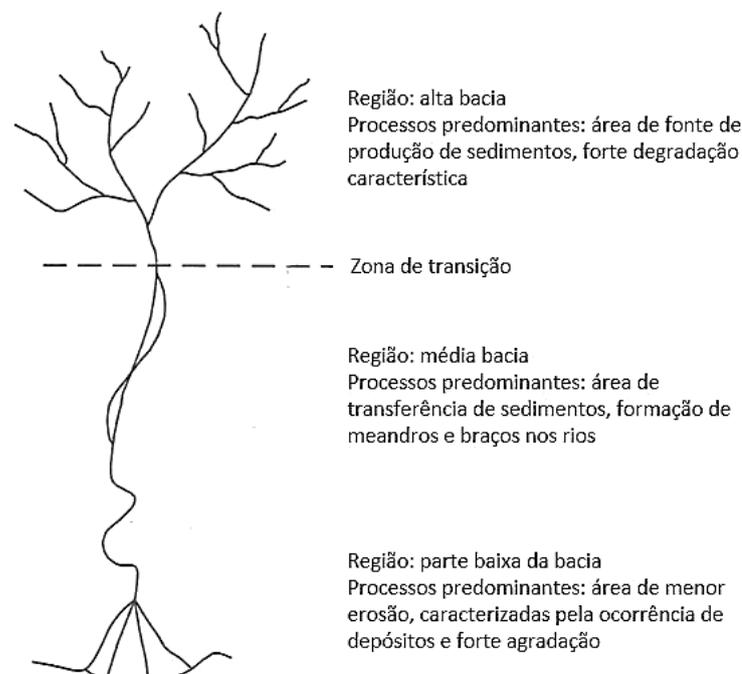
(c) Ocorrência da descarga sólida atrasada em relação a vazão.

(Fonte: adaptado de GLYSSON, 1987, p. 9-11.)

Já o processo de deposição é definido como a parada total das partículas sólidas em suspensão que foram recém decantadas sobre o fundo, ou que haviam sido transportadas por arraste (BORDAS & SEMMELMANN, 2009). A deposição gera padrões de distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, onde a carga do leito (principalmente areia e cascalho) tende a se acumular ao longo da rede de drenagem, e as partículas mais finas (como silte e argila) acumulam-se nas planícies de inundação, quando ocorre o transbordamento do canal (VANONI, 1977).

O processo sedimentológico atuante em determinado local está associado com a região da bacia hidrográfica a qual este está localizado. Segundo Carvalho (2008), em regiões mais altas há predominância de erosão e transporte de sedimentos. À medida que nos deslocamos a jusante da cabeceira, conforme a declividade e a intensidade das precipitações diminui, a erosão também tende a ser menor, sendo os processos deposicionais predominantes na parte baixa da bacia. Nas partes altas da bacia hidrográfica predomina a degradação dos solos, enquanto que a agradação prevalece nas partes baixas (CARVALHO, 2008), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3. Processos hidrossedimentológicos e sua zona de ocorrência na bacia hidrográfica.



(Fonte: adaptado de CARVALHO, 2008, p. 79)

### 3.2.2. Fatores que influenciam na erosão

Alguns dos principais fatores que influenciam na suscetibilidade de uma região à ocorrência de erosão são o clima, o relevo, tipo e uso do solo e a vegetação (FARIA et al., 2003; PIMENTEL et al., 1995). Em relação ao clima, os fatores mais importantes são a intensidade, a quantidade e a distribuição temporal das precipitações. Quando a chuva ocorre em grande intensidade, tende a gerar maiores volumes de escoamento superficial em um menor intervalo de tempo, causando enxurradas e provocando grandes erosões. Uma distribuição temporal caracterizada por períodos de seca também aumenta a potencialidade erosiva da chuva, pois a precipitação tende a encontrar solos muito secos e descobertos, tornando-o vulnerável ao desgaste (LEPSCH, 2010).

Quanto à natureza dos solos, textura, permeabilidade e profundidade definem sua suscetibilidade à erosão. Solos arenosos tendem a ser mais facilmente erodidos do que solos argilosos, por possuírem menor coesão entre partículas. Da mesma maneira, solos mais rasos tendem a sofrer maior erosão do que solos profundos, pois saturam-se mais rapidamente e isto facilita o escoamento superficial (LEPSCH, 2010). Em relação ao relevo, a taxa de erosão tende a ser mais elevada em áreas de maior declividade em contraponto a regiões de médio a baixo declive. Agravando este fator, muitas destas regiões mais íngremes estão sendo convertidas de florestas para uso agrícola, devido ao aumento da população e da crescente demanda por alimento, o que deve acentuar a perda de solo (PIMENTEL et al., 1995).

Sob idênticas condições de chuva e tipo de solo, a desagregação e o transporte de partículas serão diferentes conforme a vegetação que recobre o local. Solos completamente cobertos com vegetação possuem melhores condições de absorver o impacto causado pelas gotas de chuva e resistir à erosão (LEPSCH, 2010). Culturas anuais, como milho, trigo e soja, provocam uma maior exposição do solo do que cultivos perenes, como por exemplo laranja e café. O uso de práticas conservacionistas adequadas ao tipo de cultivo e à área onde o mesmo se desenvolve é essencial para a preservação da qualidade do solo, visto que o solo erodido pode conter até três vezes mais nutrientes do que o solo remanescente no terreno (PIMENTEL et al., 1995). O correto manejo do solo auxilia no controle da erosão, resultando na manutenção e conservação da qualidade do solo e da água, não só no local de interesse, mas em toda a bacia hidrográfica.

### 3.2.3. O efeito dos processos erosivos e a produção de sedimentos

Estudos apontam que as taxas médias de erosão de solos variam entre 12 a 15 toneladas por hectare por ano, o que equivale a uma perda de 0,9 mm de camada de solo por ano (FAO, 2015). Esta taxa é substancialmente mais alta do que a taxa de formação dos solos, tipicamente inferior a 1 tonelada por hectare por ano, com valores medianos de 0,15 tonelada por hectare por ano, o que sugere uma ameaça global a longo prazo (FAO, 2015). Os efeitos causados pela erosão podem ser avaliados no local onde ocorrem (*on-site*) ou mesmo fora deste (*off-site*), onde o impacto é avaliado a jusante de onde o processo erosivo é verificado.

Um dos efeitos “*on-site*” é causado principalmente pela utilização de práticas agrícolas de cultivo inadequadas, que acabam por limitar a capacidade de retenção de água e nutrientes, ocasionar a perda de matéria orgânica disponível e reduzir a profundidade do solo, que passa a não ser capaz de sustentar as raízes e a biota (MULLAN, 2013). Os fatores acima citados contribuem para a redução da produtividade dos solos, já que a taxa de crescimento das plantas diminui e o rendimento das colheitas também.

Em estudo realizado no estado de São Paulo, Sarcinelli et al. (2009) estimou que o custo médio gerado pela perda de nutrientes do solo (N, P, K, Ca e Mg) varia de 28 a 73 dólares por hectare a cada ano. Isto demonstra a importância e a necessidade da adoção de programas de controle de erosão *on-site*, que modificam a concepção de maior rentabilidade a curto prazo em favor de uma sustentabilidade econômica e ecológica de longo prazo, gerando benefícios para os agricultores em termos de aumento da produtividade agrícola (VANONI, 1977).

Os efeitos “*off-site*” oriundos dos processos erosivos são os mais variados, e englobam, por exemplo, assoreamento de rios, lagos e reservatórios, inundações, extravasamento de canais da calha principal, obstrução de vias navegáveis, eutrofização, perda de biodiversidade, prejuízos na qualidade da água, entre outros (TELLES, 2011). Pesquisas mais recentes também mostram que o aquecimento global pode piorar à medida que métodos agrícolas aceleram a taxa de erosão do solo. Isto ocorre devido a redução da capacidade do solo de armazenar carbono e, desta forma, acaba liberando-o para a atmosfera na forma de dióxido de carbono, um dos principais gases de efeito estufa (UNEP, 2012). Os efeitos “*off-site*” ainda podem ser divididos em danos no canal (*instream*) e fora do canal (*off-stream*), onde o primeiro remete aos problemas causados pelos sedimentos na rede de drenagem e em lagos, e

o segundo aos danos causados por enchentes ou aqueles que ocorrem antes que o sedimento aporte a um canal fluvial (CLARK, 1985).

Os efeitos no canal decorrentes dos processos erosivos podem afetar uma série de usos da água na bacia hidrográfica. Os impactos nos ecossistemas aquáticos decorrem da influência exercida sobre os sedimentos nas áreas de desova, nas fontes de alimentos e nos habitats da fauna aquática. Também pode causar impactos no uso da água para recreação e navegação, elevando os custos com dragagem de vias navegáveis, hidrovias e manutenção de portos (CLARK, 1985). Um dos impactos de grande relevância econômica diz respeito às estruturas para armazenamento de água, devido à sua importância dado o aumento crescente da população, e demandas associadas às atividades econômicas, de irrigação e geração de energia. Para manter a capacidade dos reservatórios – ou mesmo recuperar a capacidade perdida – são aplicadas técnicas de remoção de sedimentos, como por exemplo a dragagem. A curto prazo a dragagem pode ser um processo tecnicamente e economicamente viável, entretanto a técnica não é suficiente para controlar a sedimentação a longo prazo (MORRIS & FAN, 1998).

Um dos principais efeitos fora do canal causado pelos sedimentos refere-se aos danos por inundações. Eles são potencializados devido ao assoreamento de rios e canais, o que diminui a área de escoamento ao longo do leito, aumentando a frequência de ocorrência e a profundidade das inundações (CLARK, 1985). Além disso, muitos danos são causados diretamente pelo sedimento presente na água, que acaba depositando após a passagem da cheia nas áreas atingidas pelas inundações, dificultando a limpeza e recuperação destes locais. A presença de sedimentos em instalações destinadas à drenagem urbana também causa danos às estruturas e eleva os custos de manutenção, devido à necessidade periódica de remoção dos sólidos. Em estações de tratamento de água os custos aumentam devido à necessidade de adição de coagulantes químicos e limpeza mais frequente de filtros, para que o padrão de qualidade na distribuição seja mantido (CLARK, 1985).

Considerando diversos cenários futuros, comparando os potenciais impactos causados pelos processos erosivos, observa-se que os efeitos *off-site* tendem a se tornar uma questão ambiental de maior relevância no que concerne à qualidade de água e inundações, em comparação aos efeitos *on-site* (MULLAN, 2013). Um planejamento correto das propriedades agrícolas, com técnicas adequadas de plantio e manejo do solo, tende a aproximar a produção

de sedimentos aos valores de áreas preservadas (MINELLA, 2007). Uma estratégia como essa pode ser aplicada visando diminuir a magnitude dos danos *off-site*, causados além das zonas de plantio.

### 3.3 MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

A sedimentometria é a área de conhecimento que estuda as medidas de quantidade de sedimentos transportadas pelos rios. É estudada juntamente à fluviometria, devido aos problemas causados pelos sedimentos ao longo de canais naturais e de obras hidráulicas (CARVALHO, 2008). A descarga sólida é estabelecida como a massa total de sedimentos que atravessa uma seção transversal de um rio em um intervalo de tempo (VANONI, 1977). Já a carga de sedimentos diz respeito ao tipo de material transportado, e pode-se dividir em três tipos: dissolvida, em suspensão e do leito (SANTOS et al., 2001).

#### 3.3.1. Carga dissolvida

A carga dissolvida dos cursos d'água é composta pelos constituintes provenientes do intemperismo de rochas, transportados pelo escoamento subterrâneo, bem como por processos de poluição difusa, como o carreamento de fertilizantes através do escoamento superficial (SANTOS et al., 2001). Embora não seja visível, a carga dissolvida pode representar uma parcela importante da descarga sólida, principalmente em alguns rios de ambientes cársticos, onde esta parcela de carga é de grande importância.

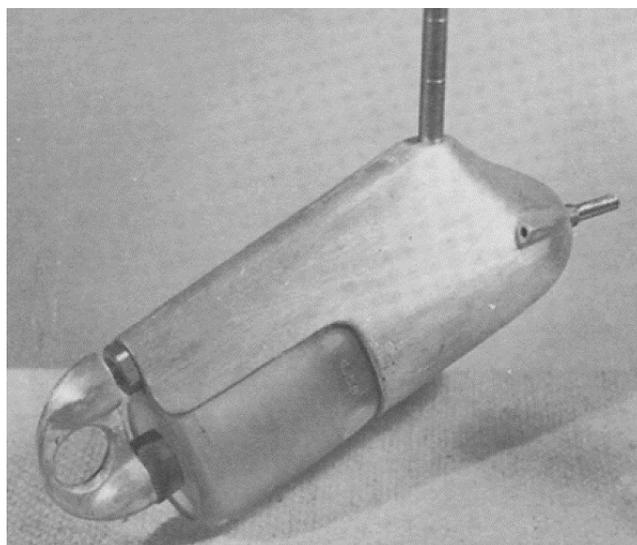
#### 3.3.2. Carga em suspensão

A carga em suspensão é composta pela fração mais fina (geralmente partículas de siltes e argilas) do material carregado pelo escoamento, sendo transportada praticamente na mesma velocidade do fluxo. Normalmente demonstra uma boa correlação direta entre o valor da vazão e a concentração de material em suspensão para uma mesma seção transversal, sendo a carga de suspensão e a carga dissolvida determinadas conjuntamente, a partir da coleta de uma amostra (SANTOS et al., 2001).

Os equipamentos para a coleta de amostras em suspensão normalmente têm um formato hidrodinâmico, podendo realizar coletas pontuais ou por integração na vertical. Este funciona a partir da acumulação de uma mistura de água-sedimentos no interior de um recipiente, obtida a partir do movimento constante de subida e descida do amostrador, da superfície até próximo ao leito. Os amostradores não devem tocar o leito do rio, de forma a não coletarem sedimento em arraste, configurando assim uma parcela de zona não amostrada na vertical, que varia geralmente entre 10 e 15 cm (SANTOS et al, 2001).

Alguns amostradores comumente utilizados são: tipo US DH-59, que opera a partir de um guincho hidrométrico e possibilita a amostragem para baixas velocidades; o US D-49, semelhante ao anterior, porém opera em maiores velocidades; e o mais utilizado, do tipo US DH-48, que opera com haste graduada e é utilizado para rios de pequeno porte, em medições a vau (CARVALHO et al., 2000). O amostrador US DH-48 possui três diferentes bicos para utilização (1/8", 3/16" e 1/4") e acumula sedimentos em suspensão no interior de uma garrafa que pode coletar até 1,0 l de amostra, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Amostrador de sedimentos em suspensão US DH-48.



(Fonte: CARVALHO et al., 2000, p. 33.)

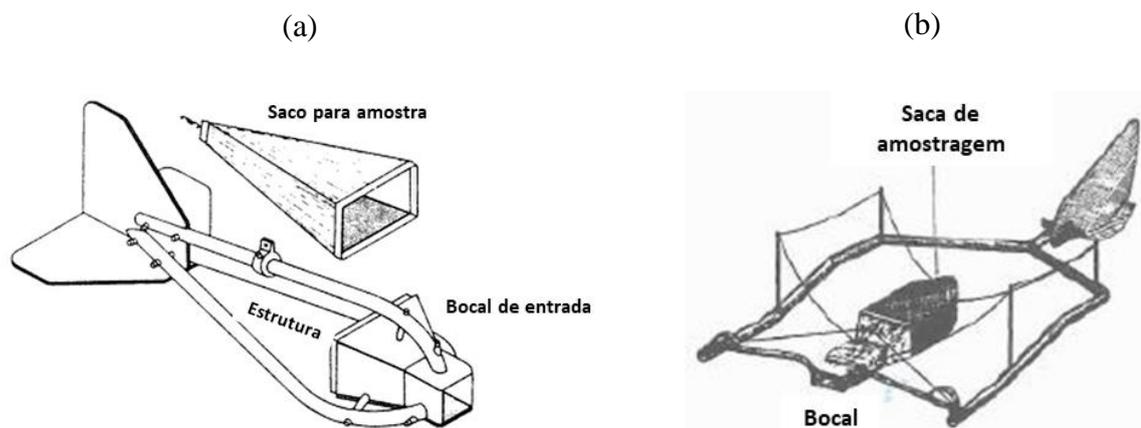
### 3.3.3. Carga do leito (arraste e saltação)

A carga de leito é responsável pelo transporte das maiores partículas, geralmente areias e cascalhos, seja por arraste (deslizamento e/ou rolamento) ou por saltação. Estas partículas tendem a se mover com menor velocidade que a do fluxo, devido a sua densidade, ao deslocamento intermitente e a menor velocidade do escoamento junto ao fundo. Os sedimentos transportados desta forma sofrem abrasão e diminuição do tamanho devido a choques e atritos, ocasionando a diminuição da granulometria do material aluvial para jusante (SANTOS et al., 2001).

A medição direta da descarga sólida de arraste é de difícil operacionalização e, portanto, de pouco uso prático. Por conta disso, desenvolveram-se métodos semiempíricos para a estimativa da parcela de sedimento do leito, baseado em variáveis de mais fácil obtenção. Entretanto, alguns métodos de medição direta de descarga sólida do leito ainda são aplicados; entre eles, estão as medições por meio de armadilhas, a medição através de estruturas fixas – como poços ou fendas no leito do rio – e medições utilizando amostradores portáteis (SANTOS et al., 2001).

Entre os amostradores portáteis, os que mais se destacam são dois tipos que funcionam por diferença de pressão, conhecidos como amostradores Arnhem e Helley-Smith (CARVALHO, 2008), ilustrados na Figura 5. Podem ser operados embarcados, com auxílio de guincho hidrométrico, ou mesmo a vau. O funcionamento dos aparelhos se dá através da entrada de água com sedimentos pelo bocal do amostrador, posicionado no sentido do fluxo, com praticamente a mesma velocidade do escoamento. Os sedimentos ficam retidos em uma saca com malha que permite a passagem de água, sendo posteriormente retirados para análise.

Figura 5. Amostradores de sedimento de leito Helley-Smith (a) e Arnhem (b).



(Fonte: EMMETT, 1979, p. 3. (a) e SANTOS et al., 2001, p. 264 (b).)

### 3.3.4. A curva-chave de sedimentos

Para a realização da coleta de amostras de sedimento periódicas é necessária uma equipe de hidrometristas qualificados, o que dispende tempo e custos financeiros. Dessa forma, é comum a utilização da curva-chave de sedimentos, que relaciona parâmetros associados ao sedimento, como concentração de sólidos em suspensão (CSS), descarga sólida total ( $Q_{st}$ ), turbidez, entre outros, com parâmetros relacionados ao escoamento, como vazão, velocidade e nível d'água. A relação de valores mais utilizada, normalmente, é a de concentração de sedimentos em suspensão (ou descarga sólida total) com a descarga líquida (MERTEN et al., 2007). A partir de uma curva-chave ajustada, torna-se possível estimar em períodos sem medição a descarga sólida (ou a concentração de sedimentos) a partir de registros de nível ou de vazão, utilizando medições pontuais já realizadas de ambas as grandezas.

Entre os métodos mais utilizados para o traçado da curva-chave estão o método do traçado visual e o método da regressão linear, sendo o formato mais comum da curva-chave em forma de potência (CARVALHO, 2008), conforme apresentado na Equação 1. A Figura 6 apresenta um exemplo de curva-chave de sedimentos ajustada.

$$Q_{st} = a \cdot Q^n$$

Equação 1

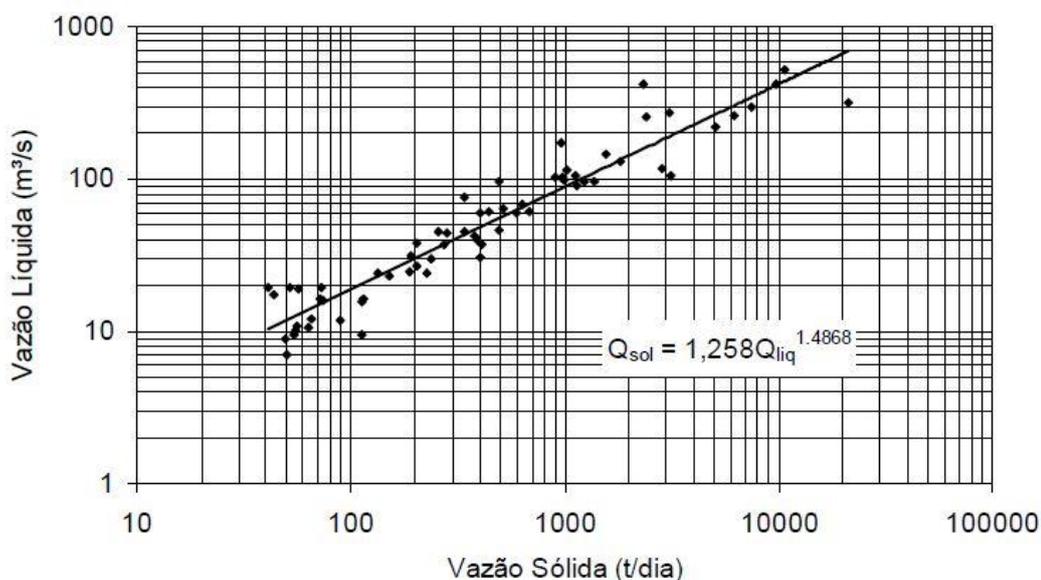
Onde:

$Q_{st}$  é a descarga sólida total em  $\text{ton.d}^{-1}$ ;

$Q$  é a descarga líquida em  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ; e

$a$ ,  $n$  são valores adimensionais obtidos no ajuste.

Figura 6. Exemplo de curva chave de sedimentos ajustada.



(Fonte: FILL & SANTOS, 2001, p. 3.)

Apesar de amplamente utilizado, o método da curva-chave de sedimentos apresenta dispersão e muitas vezes pouca precisão dos resultados obtidos (FILL & SANTOS, 2001). Para locais com sazonalidade de precipitação, os valores obtidos de descarga sólida no período seco podem ser muito diferentes do período úmido, sendo necessário o ajuste de duas curvas distintas. Além disso, quanto maior o número de pontos medidos em uma maior variação de valores de vazão, maior será a confiabilidade de ajuste dos dados (CARVALHO, 2008). Walling & Webb (1988) apontam que a curva-chave de sedimentos não é capaz de representar os efeitos da histerese, já que para uma mesma vazão podem ocorrer diferentes valores de concentração de sedimentos em suspensão, devido a subida e a descida de uma onda de cheia.

### 3.3.5. Concentração de sedimentos em suspensão e sua relação com a turbidez

A concentração de sedimentos em suspensão em canais naturais pode variar de magnitude durante eventos de cheia, às vezes até sendo fracamente relacionada com as variações de vazão observadas. Assim, o monitoramento contínuo da turbidez surge como um parâmetro de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (MORRIS & FAN, 1998).

O instrumento mais utilizado para quantificação da turbidez é o turbidímetro nefelométrico, gerando resultados em unidades de NTU (Nefelometric Turbidity Unit). Sensores de turbidez calibrados costumam apresentar correlações lineares entre a concentração e a medida de turbidez, porém quando o tamanho das partículas varia com a concentração, a resposta tende a ser não linear (SANTOS et al., 2001). Dessa forma, os turbidímetros devem ser calibrados para as condições *in situ* de monitoramento.

A relação entre turbidez (em unidades de NTU) e a concentração geralmente é representada pela Equação 2 para regressões lineares e pela Equação 3 para regressão potencial (MORRIS & FAN, 1998).

$$T = a \cdot K_t \cdot CSS + b \quad \text{Equação 2}$$

$$T = a \cdot CSS^c + b \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

T é a turbidez;

$K_t$  é a turbidez específica;

CSS é a concentração de sedimentos em suspensão; e

a, b, c são constantes, função da composição mineral do sedimento e da presença de matéria orgânica.

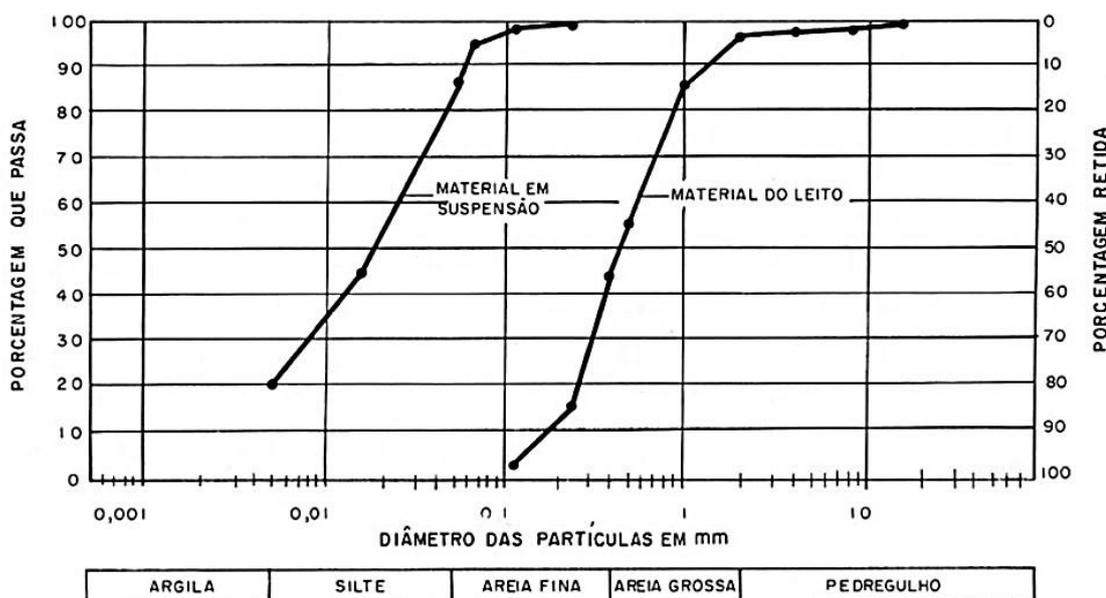
Apesar das vantagens de utilização da medição de turbidez como parâmetro para monitoramento contínuo em rios, a sua relação com a concentração de sedimentos varia no tempo, em função das mudanças nas fontes de sedimentos e cargas orgânicas (SANTOS et al.,

2001). Portanto, a continuidade das coletas de amostras de descarga sólida é indispensável, de forma a aperfeiçoar a calibração do sensor. Para Morris & Fan (1998), algumas desvantagens associadas a utilização do monitoramento da turbidez é a baixa sensibilidade de medição de partículas mais grossas (por exemplo, areias) e a impossibilidade de monitoramento da granulometria dos sedimentos.

### 3.3.6. Curva granulométrica dos sedimentos

A partir das amostras de sedimento coletadas é possível realizar a construção de uma curva granulométrica, utilizada para a determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência. Para determinar a distribuição granulométrica da porção de finos da amostra, caracterizada por siltes e argilas, normalmente se utiliza o ensaio de sedimentação; já para a porção granular, característica do leito de areias e pedregulhos, a metodologia mais usual é o ensaio de peneiramento (SCAPIN, 2005). A Figura 7 exibe a comparação entre os casos acima citados, apresentando duas curvas representativas: uma de materiais finos e outra de materiais grosseiros.

Figura 7. Exemplo de curva granulométrica de material em suspensão e material do leito.



(Fonte: CARVALHO et al., 2000, p.66.)

A partir da união dos resultados de granulometria de materiais finos e grosseiros se obtêm uma única curva granulométrica, da qual é possível extrair os diâmetros característicos para as porcentagens acumuladas, que são denominados de  $D_{10}$ ,  $D_{35}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{65}$  e  $D_{90}$  (CARVALHO et al., 2000). Esses diâmetros são utilizados em diversas equações de estimativa de descarga sólida, a partir da classificação granulométrica dos sedimentos proposta pela União Geofísica dos Estados Unidos (*American Geophysical Union - AGU*) e apresentada conforme Tabela 1 abaixo.

Tabela 1. Classificação granulométrica dos sedimentos.

Classe	Diâmetro (mm)
Matacão	Maior que 256
Cascalho	256 – 2
Areia grossa	2 – 0,5
Areia média	0,5 – 0,25
Areia fina	0,25 – 0,062
Silte	0,062 – 0,004
Argila	Menor que 0,004

(Fonte: adaptado de U.S. Army Corps of Engineers, 1995, p.7-2.)

### 3.3.7. Importância do monitoramento hidrossedimentológico

A capacidade de compreender como se desenvolvem os processos hidrossedimentológicos em uma bacia hidrográfica e como estes respondem aos efeitos causados por diferentes usos e práticas de manejo do solo depende, fundamentalmente, do monitoramento adequado das variáveis envolvidas neste sistema. A qualidade dos resultados gerados pelo monitoramento eleva-se quanto maior for a frequência de amostragem. Assim, um número maior de amostragens em um menor intervalo de tempo aumenta a probabilidade de coletas em eventos de cheia, que geralmente são os principais responsáveis pelos picos de produção de sedimentos nas bacias hidrográficas (MINELLA, 2007).

O monitoramento e a amostragem em campo são de extrema importância para a modelagem hidrossedimentológica. É a partir dos dados coletados em campo que se torna possível avaliar a adequabilidade dos modelos em representar os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica, e desta forma analisar a aplicabilidade da modelagem na região que se pretende estudar. Devido à pouca disponibilidade de dados medidos, algumas são as incertezas que

permeiam a modelagem hidrossedimentológica, devido à falta de dados que possibilitariam a verificação do funcionamento dos modelos na maioria das bacias hidrográficas brasileiras.

### 3.4 MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

Modelos são ferramentas desenvolvidas para melhor entender e representar fenômenos naturais, além de serem utilizados para prever condições diferentes daquelas já observadas em um sistema (TUCCI, 2005). Com o aumento da capacidade de computação observada nos últimos anos, cresce cada vez mais a utilização de modelos de geração e transporte de sedimentos através da modelagem computacional (MERRITT et al., 2003). Muitos são os modelos que se destinam a simular os processos hidrossedimentológicos de erosão, transporte e deposição em bacias hidrográficas, diferindo entre si em níveis de complexidade, escala de análise e necessidade de dados (BUARQUE, 2015; MERRITT et al., 2003).

Com o intuito de estimar a perda de solos, Wischmeier & Smith (1965) desenvolveram a USLE (*Universal Soil Loss Equation*), ou Equação Universal de Perda de Solo, cuja formulação é apresentada na Equação 4.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

A é a perda de solo calculada por unidade de área, em  $t \cdot ha^{-1}$ ;

R é a erosividade da chuva, medido a partir da força erosiva de uma precipitação, em  $(t \cdot m \cdot ha^{-1}) \cdot (mm \cdot h^{-1})$ ;

K é a erodibilidade do solo, que representa a capacidade de um determinado solo sofrer erosão quando da ocorrência de uma precipitação, em  $(t \cdot ha^{-1}) \cdot [(t \cdot m \cdot ha^{-1}) \cdot (mm \cdot h^{-1})]^{-1}$ ;

L é um fator topográfico que representa o comprimento do declive, adimensional;

S também é um fator topográfico e representa o gradiente de declividades, adimensional;

C é o fator que expressa o uso e manejo da cultura e do solo, adimensional; e

P é o fator que expressa a utilização de práticas conservacionistas de controle da erosão, que assume o valor de 1 quando nenhuma prática é utilizada, adimensional.

A simplicidade da equação e o pequeno número de parâmetros de entrada fez a USLE se difundir com facilidade. Entretanto, por ser uma equação empírica desenvolvida em parcelas experimentais de declividade constante, o método possui algumas limitações. Algumas das limitações referem-se ao modelo não ser baseado em eventos, o que o impede de identificar os episódios com maior probabilidade de erosão do solo, e o fato de estimar apenas uma perda de solos média anual, e não a produção de sedimentos (MERRITT et al., 2003).

Como apenas uma parte do sedimento erodido nas vertentes aportará ao exutório da bacia, sendo representado pela produção de sedimentos (WALLING, 1983), a utilização de modelos que estimem perda de solo deve estar associada à aplicação de uma taxa de transferência de sedimentos (*Sediment Delivery Ratio – SDR*). A magnitude da taxa de transferência de sedimentos para uma bacia é influenciada por uma ampla gama de fatores, como características geomorfológicas e ambientais (WALLING, 1983), o que dificulta ainda mais a estimativa da SDR.

Williams (1975) propôs que, se o fator de erosividade da chuva presente na USLE for substituído por um fator de taxa de escoamento, a aplicação da SDR não será mais necessária. Dessa forma, a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (*Modified Universal Soil Loss Equation – MUSLE*) foi desenvolvida visando a previsão da produção de sedimentos de eventos individuais, cuja formulação é apresentada na Equação 5 (WILLIAMS, 1975).

$$S_p = \alpha \cdot (Q_e \cdot q_p)^{\beta} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$S_p$  é a produção de sedimentos, em toneladas;

$\alpha$ ,  $\beta$  são coeficientes ajustados, adimensionais;

$Q_e$  é o volume total de escoamento superficial gerado no evento, em  $m^3$ ;

$q_p$  é a vazão de pico do evento, em  $m^3 \cdot s^{-1}$ ; e

K, L, S, C, P são os mesmos parâmetros utilizados na USLE.

Apesar das modificações propostas na MUSLE aumentarem a eficiência do modelo originalmente proposto, os fatores de erodibilidade dos solos (K), uso e manejo da cultura (C) e práticas conservacionistas (P) são os mesmos utilizados na USLE, o que dificulta sua aplicação para locais onde estes parâmetros ainda não são conhecidos (BUARQUE, 2015). Por ser um modelo empírico, formulado e ajustado a partir de dados observados, cuja escala espacial de aplicação restringe-se a bacias hidrográficas da ordem de 10 km<sup>2</sup>, a MUSLE tende a não representar de forma adequada os processos atuantes em bacias maiores, que possuem parâmetros de entrada não-homogêneos (FAGUNDES, 2018).

Com o avanço dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG), a modelagem hidrossedimentológica foi aperfeiçoada, possibilitando o desenvolvimento de modelos destinados a simulação em maior escala espacial e utilizando maiores volumes de dados, visando uma representação mais adequada da bacia hidrográfica e dos processos nela atuantes (BUARQUE, 2015; FAGUNDES, 2018). O modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tools*) foi então desenvolvido para auxiliar a gestão de recursos hídricos em grandes e médias bacias hidrográficas.

Este integra os processos de geração e transporte de sedimentos, e é classificado como modelo conceitual – que utiliza funções matemáticas para descrever processos físicos – e de simulação contínua (PANDEY et al., 2016), ou seja, considera os efeitos provocados pela ocorrência de uma série de eventos consecutivos ao longo do tempo. Quanto à escala espacial, é um modelo semi-distribuído (PANDEY et al., 2016), que considera a variabilidade de parâmetros ao longo do espaço através de subdivisões da bacia hidrográficas em elementos menores interconectados (BUARQUE, 2015).

O SWAT é o modelo hidrológico e de qualidade da água mais utilizado no mundo (ABBASPOUR et al., 2019). Por se tratar de um modelo tão difundido, disponibilizado gratuitamente e cuja utilização necessita de um período de aquecimento – por ser um modelo de simulação contínua – o SWAT foi escolhido como a ferramenta a ser utilizada neste estudo. O funcionamento do modelo, seus processos e a metodologia utilizada para a simulação são abordados em maior detalhe no capítulo 4 do presente trabalho.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 O MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)

O modelo SWAT possibilita a simulação de inúmeros processos em uma bacia hidrográfica, como a geração de escoamento superficial através da precipitação, a predição de erosão dos solos e a produção de sedimentos associada, o crescimento de culturas, estimativas de concentração de nutrientes e pesticidas em corpos d'água e o impacto do uso de práticas de manejo agrícolas na dinâmica hidrossedimentológica da bacia, entre outros (SARI, 2017). Para tal, como o modelo é baseado fisicamente, requer uma série de informações e dados de entrada específicos do sistema a ser simulado, como clima, pedologia, topografia, vegetação e uso de práticas agrícolas (NEITSCH et al., 2009). Por ser um modelo de simulação contínua, permite que sejam analisados os problemas observados em bacias hidrográficas a longo prazo. Por isso, não foi desenvolvido para simular eventos únicos, como por exemplo episódios de propagação de cheias (NEITSCH et al., 2009).

Por ser um modelo semi-distribuído, o SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias e microbacias, permitindo a análise em separado de áreas com diferentes declividades, tipos de solo e usos do terreno (NEITSCH et al., 2009); assim, torna-se possível identificar áreas de comportamento hidrossedimentológico distintas. Para cada sub-bacia, as informações são agrupadas em cinco categorias: a) clima; b) unidades de resposta hidrológica ou URH<sup>1</sup> (*Hydrologic Response Units, HRU*); c) açudes/pântanos; d) águas subterrâneas; e e) drenagem principal, ou trecho de drenagem da sub-bacia. O balanço hídrico é a componente que governa todos os processos atuantes na bacia hidrográfica. No SWAT, a simulação pode ser dividida em (NEITSCH et al., 2009):

- Fase terrestre do ciclo hidrológico: controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas carregado para o canal principal, em cada sub-bacia;
- Fase aquática do ciclo hidrológico: define como ocorre a propagação do escoamento, dos sedimentos, poluentes, etc., através da rede de drenagem até o exutório.

---

<sup>1</sup> Consiste em áreas caracterizadas pelo mesmos usos e tipos de solo, manejo agrícola e classe de declividade.

A estruturação do modelo foi dividida em oito componentes, sendo eles: i) clima; ii) hidrologia; iii) nutrientes e pesticidas; iv) erosão; v) cobertura do solo e crescimento vegetal; vi) práticas de manejo agrícola; vii) processos na rede de drenagem; e viii) corpos d'água. Cada um dos componentes é governado por uma série de equações, utilizadas pelo modelo para simulação dos processos na bacia, em que os componentes de i) a vi) representam a fase terrestre do ciclo hidrológico, enquanto os componentes vii) e viii) retratam a fase aquática (NEITSCH et al., 2009). Abaixo são abordados em mais detalhe cada um dos componentes do modelo.

i) Clima:

Na seção climática do SWAT são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo da energia do sistema, representada pela radiação solar, que incluem dados de entrada como temperatura, velocidade do vento e interação entre Sol e Terra. Um dos processos mais afetados pela radiação solar é a evapotranspiração, portanto uma estimativa adequada da energia disponível no sistema é imprescindível para uma simulação acurada de balanço hídrico. Para a estimativa de água na atmosfera, são apresentadas as equações utilizadas para distribuição da precipitação no espaço e no tempo, já que este é o principal mecanismo de entrada de água na fase terrestre do ciclo hidrológico (NEITSCH et al., 2009).

Para a criação do modelo climático necessário na simulação, o SWAT requer dados diários de precipitação, temperatura (mínima e máxima), radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Estes dados podem ser inseridos pelo usuário ou mesmo simulados a partir de dados médios mensais conhecidos; se escolhida esta última opção, o modelo dispõe de um simulador climático chamado WXGEN (SHARPLEY & WILLIAMS, 1990).

ii) Hidrologia:

Para a simulação de geração do escoamento superficial o SWAT fornece duas alternativas: o método CN (*Curve Number*) do *Soil Conservation Service* (SCS, 1972) e o método de infiltração de Green & Ampt (GREEN & AMPT, 1911). Já a evapotranspiração potencial pode ser estimada por três equações: o método de Hargreaves (HARGREAVES, HARGREAVES e RILEY, 1985), Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) ou Penman-Monteith (PENMAN & MONTEITH, 1965). O modelo calcula o pico do fluxo

gerado pelo escoamento superficial através de uma modificação do Método Racional, sendo este uma função da quantidade de água precipitada, do volume total de escoamento superficial gerado pelo evento de chuva e do tempo de concentração da sub-bacia. Este último é calculado pelo próprio modelo, somando o tempo de fluxo terrestre (do extremo montante da bacia até o início da rede de drenagem) e o tempo de fluxo no canal (contabilizado quando do aporte de água na rede de drenagem até o exutório da sub-bacia) (NEITSCH et al., 2009).

O modelo também permite estimar parâmetros relacionados à água no solo, como o escoamento subsuperficial lateral, calculado através de um modelo de armazenamento cinemático. Em relação às águas subterrâneas, o modelo classifica o sistema de duas formas: em aquífero livre e raso, que contribui para o fluxo de base nos rios, e aquífero confinado e profundo, que contribui para o retorno de fluxo fora dos limites da bacia. O SWAT também simula a percolação de água no solo que, da mesma forma que o fluxo de base, é calculado através de funções exponenciais com parâmetros empíricos (NEITSCH et al., 2009).

iii) Nutrientes e pesticidas:

Devido à sua importância para o crescimento das plantas, o nitrogênio é modelado pelo SWAT, tanto no perfil do solo como em aquíferos livres e rasos. Apesar de não possuir tanta demanda quanto o nitrogênio, o fósforo também é importante para o armazenamento e transferência de energia na planta, sendo também simulado pelo modelo (NEITSCH et al., 2009). Também é simulado o transporte de pesticidas, que são regidos pela solubilidade em água, volatilidade e facilidade de degradação, utilizando adaptações do modelo GLEAMS (LEONARD et al., 1987). A utilização deste componente do modelo não será aplicada ao longo deste trabalho.

iv) Erosão:

O modelo SWAT simula a produção de sedimentos gerada pela precipitação e pelo escoamento superficial através da MUSLE, para cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) gerada. Por substituir o fator de energia da chuva presente na USLE por um fator de escoamento, a MUSLE permite estimar a produção de sedimentos nas URHs e não apenas a perda de solo média. Entretanto, os demais fatores presentes na equação original ainda devem ser inseridos como dados de entrada no modelo, como a erodibilidade, cobertura e manejo dos solos, o uso de práticas conservacionistas e o fator topográfico (NEITSCH et al., 2009).

O modelo ainda permite simular o transporte de nutrientes, pesticidas, bactérias e avaliar parâmetros de qualidade da água (NEITSCH et al., 2009). Após atingir o canal de drenagem, são aplicados métodos de propagação das descargas sólida e líquida, que serão abordados em maior detalhe no item vii).

v) Cobertura do solo e crescimento vegetal:

O crescimento da planta simulado no SWAT é uma versão simplificada do modelo de crescimento vegetal EPIC (WILLIAMS et al., 1989). O desenvolvimento das plantas é baseado na acumulação diária de calor, e fatores que podem inibir o crescimento são a temperatura, disponibilidade hídrica e estresse por nitrogênio ou fósforo.

vi) Práticas de manejo agrícola:

Por se tratar de um modelo voltado às questões ambientais, quantificar o impacto do uso e manejo do solo na quantidade e qualidade da água é uma das premissas do SWAT. Ele permite a inserção de opções mais gerais de gestão, como o terraceamento, plantio em curvas de nível, inserção de drenos, entre outros (NEITSCH et al., 2009). Para isto, utiliza principalmente algoritmos provenientes do modelo ALMANAC (KINIRY et al., 1992), que simulam tais processos. O SWAT também permite simular práticas de gestão hídrica, como irrigação e drenagem agrícola, além de gestão em áreas urbanas (NEITSCH et al., 2009).

vii) Processos na rede de drenagem:

Os principais processos modelados pelo SWAT na rede de drenagem são o movimento da água, dos sedimentos e de outros constituintes presentes no escoamento, como por exemplo nutrientes e pesticidas (NEITSCH et al., 2009). Quanto ao fluxo de água no canal, o modelo simula o escoamento para uma condição de superfície livre, na qual utiliza a equação de Manning para estimar a velocidade do fluxo. O transporte de água no canal pode ser realizado utilizando-se o Método de Muskingum (McCARTHY, 1938) ou o Método da Acumulação Variada (WILLIAMS, 1969). O SWAT também simula as perdas às quais o fluxo de água transportado ao longo da rede de drenagem está sujeito, como evaporação, transmissão para o aquífero e retirada de água para agricultura ou consumo humano (NEITSCH et al., 2009).

O sedimento que é gerado nas sub-bacias através da MUSLE atinge a rede de drenagem, sendo encaminhado através do canal considerando a ocorrência de processos simultâneos - deposição e degradação (NEITSCH et al., 2009). A simulação do transporte de sedimentos consiste em dois componentes, um chamado de componente de paisagem e o outro de componente de canal.

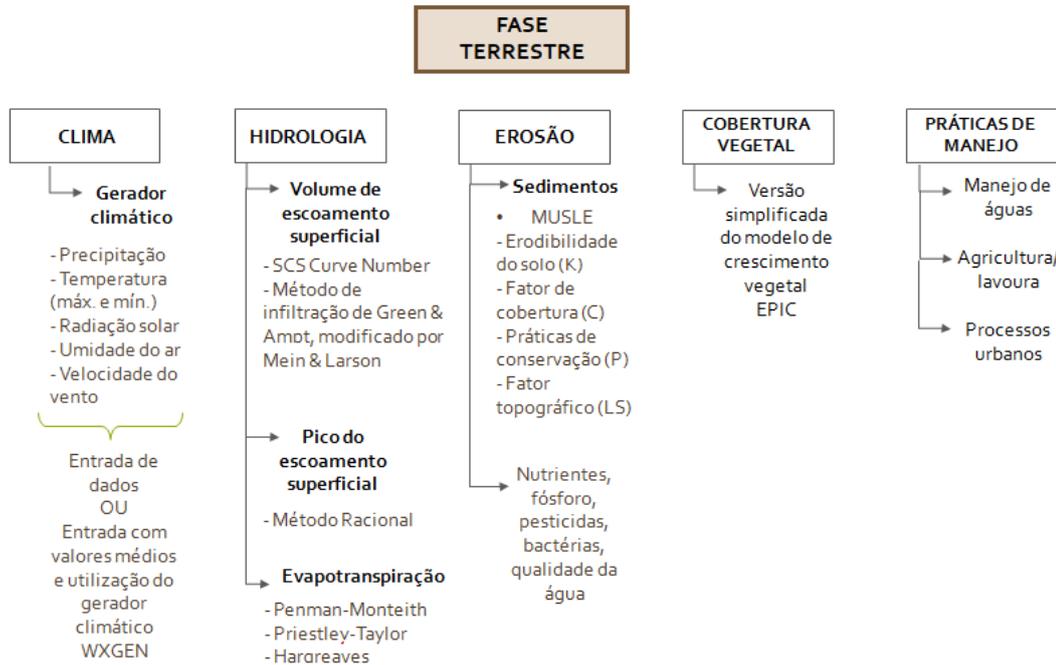
A propagação do sedimento no canal é realizada, por padrão, através de uma versão simplificada da equação de Bagnold, que estima a máxima quantidade de sedimentos que pode ser transportada, através do cálculo de capacidade do trecho. O que determina, então, a proporção de perdas e acumulação de sedimento ao longo do trecho de drenagem é a energia do escoamento disponível (SARI, 2017). Outras opções para a propagação do sedimento ainda estão disponíveis, como os modelos de Kodatie, de Molinas e Wu e de Yang (NEITSCH et al., 2009).

viii) Corpos d'água:

Devido à sua importância para o abastecimento de água e controle de cheias, o SWAT modela quatro tipos de zonas de acumulação de água, sejam eles naturais ou artificiais: lagoas, áreas úmidas, depressões/buracos e reservatórios (NEITSCH et al., 2009). Os três primeiros estão localizados no interior de uma sub-bacia do canal principal; os reservatórios estão localizados na rede de drenagem principal, recebendo água de todas as sub-bacias posicionadas a montante.

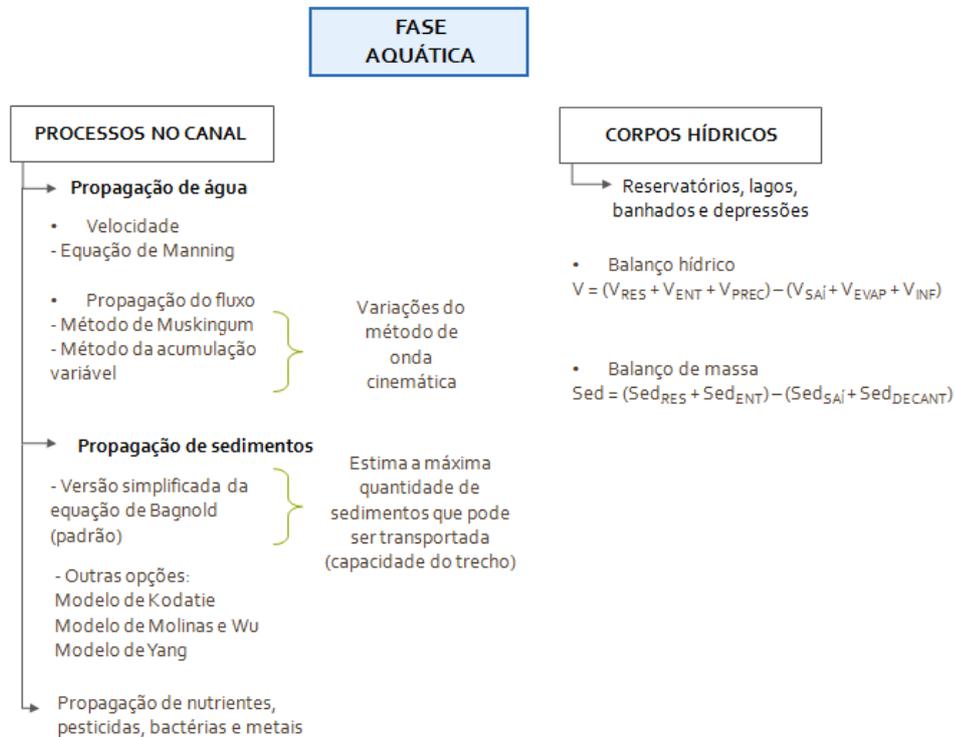
Para simular o transporte de sedimentos em corpos d'água, o modelo calcula um balanço de massa simplificado, considerado o mesmo para todos os tipos de zonas de acumulação de água. Ele também considera que o sistema se encontra completamente misturado, o que implica que o sedimento introduzido é instantaneamente distribuído por todo o volume. O SWAT também simula o estado trófico de corpos d'água, utilizando um modelo empírico simplificado (NEITSCH et al., 2009). A Figura 8 a seguir ilustra resumidamente as metodologias disponíveis na fase terrestre para aplicação do modelo SWAT, enquanto que a Figura 9 ilustra as informações referentes à fase aquática.

Figura 8. Metodologias disponíveis na fase terrestre (vertentes) do modelo SWAT.



(Fonte: própria da autora.)

Figura 9. Metodologias disponíveis na fase aquática (canais) do modelo SWAT.



(Fonte: própria da autora.)

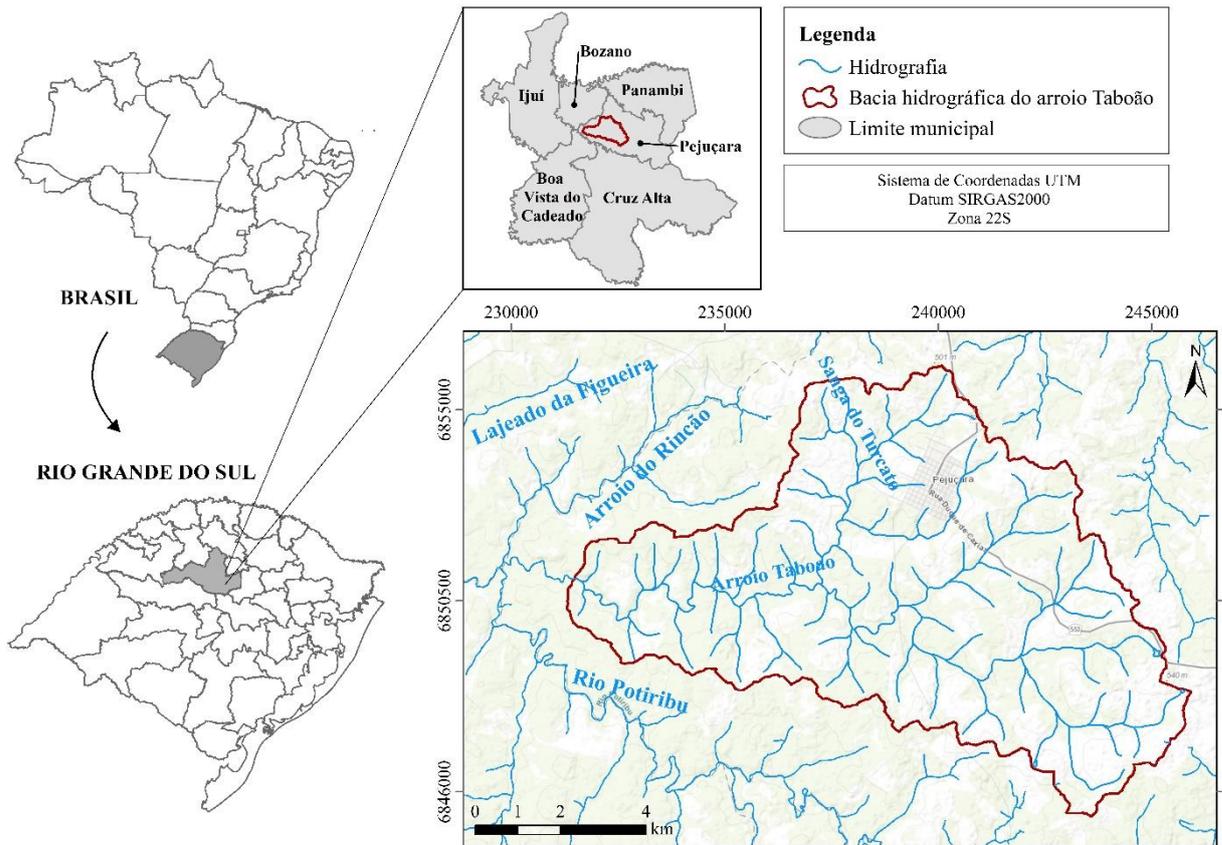
Para a aplicação do SWAT no presente trabalho, as etapas de simulação citadas anteriormente serão realizadas em ambiente computacional através de uma extensão do modelo, que funciona acoplada a ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A ferramenta a ser utilizada é a extensão ArcSWAT, que acoplada ao software ArcGIS v.10.3.1 (ESRI®) permite uma interface amigável para a aplicação do modelo.

#### 4.2 ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TABOÃO

Dado o objetivo do presente trabalho, verificou-se a necessidade de aplicar esta metodologia em uma bacia hidrográfica com uma longa série temporal de dados disponíveis, de forma que diferentes extensões de série – das mais curtas às mais longas – possam ser utilizadas, e uma comparação entre os resultados gerados seja feita. Desde 1989 o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) participa de uma pesquisa que tem por objetivo conhecer os impactos sobre o comportamento hidrossedimentológico dos solos e rios da região do planalto basáltico do Rio Grande do Sul. Este estudo, conhecido como *Projeto Potiribu*, possui um banco de dados proveniente de muitos anos de monitoramento de precipitação, vazão, sedimentos, entre outros (CHEVALLIER, 1993). Assim, a bacia hidrográfica do arroio Taboão, uma sub-bacia do rio Potiribu, foi escolhida como a área de estudo deste trabalho.

A bacia hidrográfica do arroio Taboão possui uma área de drenagem de aproximadamente 78 km<sup>2</sup>, e está localizada no município de Pejuçara, na porção noroeste do estado do Rio Grande do Sul (SARI, 2017). A Figura 10 apresenta a localização geral do município onde a bacia hidrográfica se encontra, bem como o arroio Taboão e sua respectiva área de contribuição.

Figura 10. Localização geral da área de estudo.



(Fonte: própria da autora.)

#### 4.2.1. Clima e hidrografia

O clima da área de estudo, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo subtropical úmido (Cfa). Este tipo de clima, mesotérmico, possui a estação quente (verão) e a estação fria (inverno) bem definidas, com ocorrência de precipitação em todos os meses do ano e, conseqüentemente, inexistência de uma estação seca definida. A temperatura média do ar no mês mais quente tende a ser superior a 22°C, e nos meses mais frios regula entre -3°C e 18°C (NIMER, 1989).

Quanto ao regime pluviométrico, as precipitações na região tendem a ser bem distribuídas ao longo do ano, sem identificação de um período específico de estiagem. A precipitação média anual, segundo a Normal Climatológica do Brasil 1981-2010 (INMET, 2018), é de

aproximadamente 1850 mm, com maior média mensal no mês de outubro (cerca de 200 mm) e menor média mensal para os meses de março e agosto (ambos em torno de 125 mm).

A temperatura média do ar varia entre 13°C e 24°C, com ocorrência de temperaturas mínimas absolutas de até -3°C, registrada em julho de 2000 (no período de inverno), e máximas absolutas de 37,5°C, registrada em dezembro de 2008 (no período de verão). A partir disso, pode-se considerar que a amplitude térmica da região de estudo é elevada, apresentando a média das temperaturas máximas do mês mais quente em torno de 30°C e a média das temperaturas mínimas do mês mais frio em torno de 9°C (INMET, 2018).

A evapotranspiração potencial total de um ano é de aproximadamente 1440 mm, sendo as maiores médias diárias observadas no mês de dezembro, com 5,9 mm.dia<sup>-1</sup>, e as menores médias diárias para os meses de junho e julho, cerca de 2,4 mm.dia<sup>-1</sup>. A umidade relativa do ar média anual é de 77%, com valor mínimo no mês de dezembro (69,5%) e valor máximo no mês de junho (82,9%). A insolação média anual na região é de aproximadamente 7 horas de sol por dia, sendo mais intensa no período compreendido pelos meses de novembro a janeiro, com máximas de até 11 horas diárias de sol (INMET, 2018).

Sobre a hidrografia local, os principais afluentes do arroio Taboão são os arroios Donato e Turcato, ambos pela margem direita. O arroio Taboão, por sua vez, é um dos contribuintes do rio Potiribu, este sendo um afluente da margem esquerda do rio Ijuí, que desagua no rio Uruguai. Desta forma, a área de estudo encontra-se inserida na bacia hidrográfica do rio da Prata (CHEVALLIER, 1993).

#### **4.2.2. Altimetria e declividades**

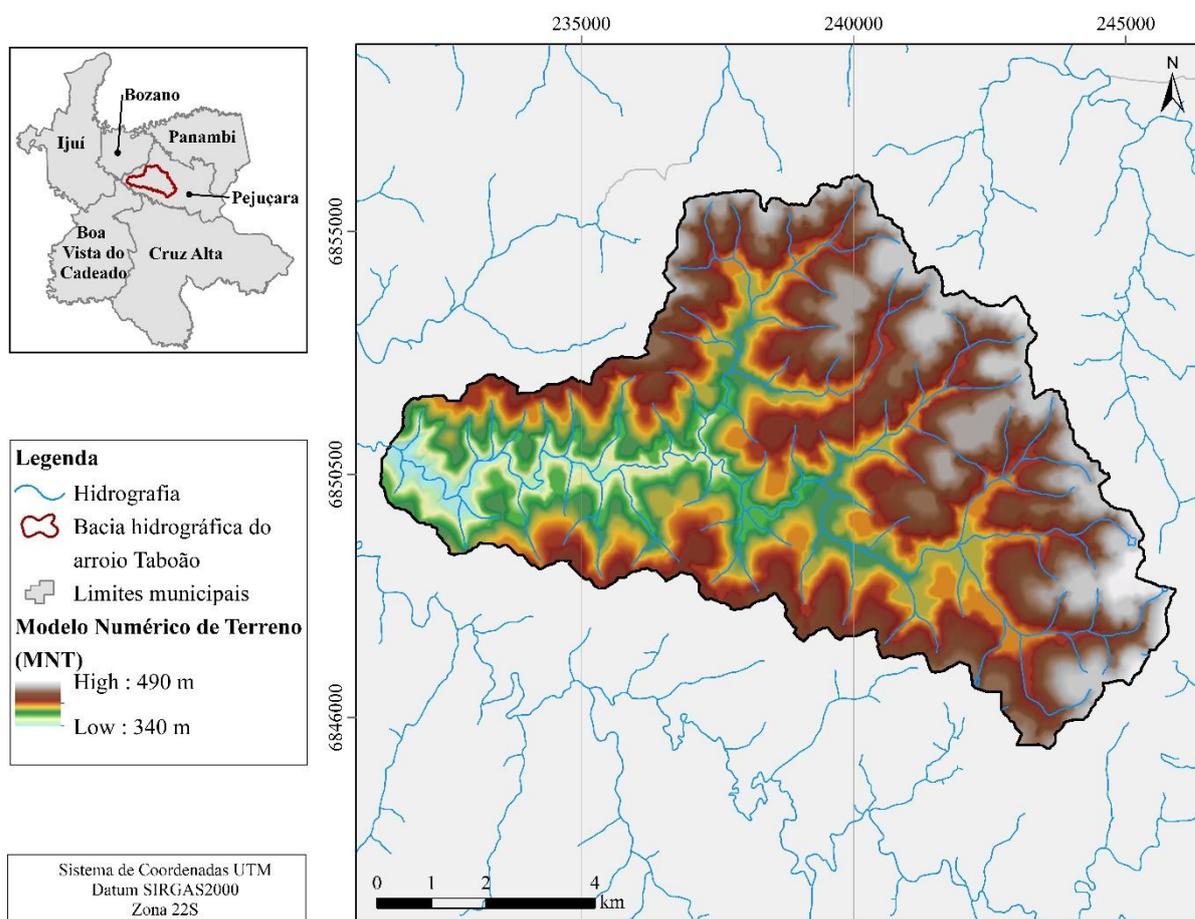
A unidade geomorfológica na qual a área de estudo encontra-se inserida é denominada Planalto Santo Ângelo, que apresenta um relevo caracterizado por colinas suaves e arredondadas e morros baixos, com vales fluviais de profundidades variando entre 22 m e 28 m (VIEIRO, 2004). Esta formação é composta por litologias de origem vulcânica da Formação Serra Geral e sedimentares da Formação Tupanciretã (CPRM, 2010).

O Modelo Numérico de Terreno (MNT) da bacia hidrográfica do arroio Taboão foi obtido através de cartas topográficas e fotografias aéreas, disponíveis através da Divisão de Serviços

Geográficos do Exército, a partir de levantamentos realizados na escala 1:50.000, com curvas de nível equidistantes de 4 m (DEPINÉ, 2014). O arquivo matricial contendo estas informações, utilizado no presente trabalho, foi obtido através de Sari (2017).

A partir da altimetria do terreno, ilustrada na Figura 11, é possível analisar as características do relevo da área de estudo, que apresenta amplitudes de elevação variando entre 340 m e 490 m, configurando um desnível máximo de aproximadamente 150 m. A bacia possui um formato alongado, estando o eixo do principal curso d'água orientado no sentido noroeste, sendo que as maiores altitudes são observadas na porção leste.

Figura 11. Altimetria da bacia hidrográfica do arroio Taboão.

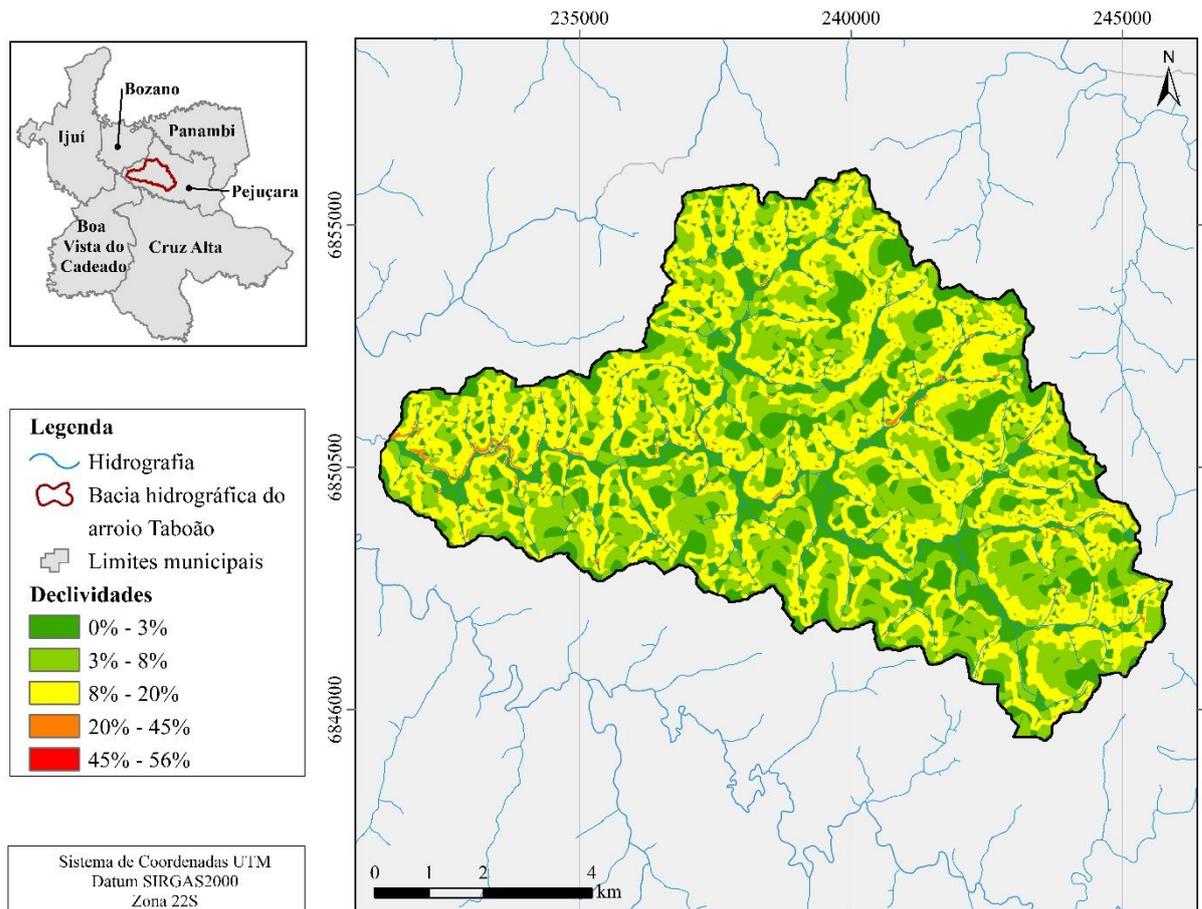


(Fonte: própria da autora.)

Com a altimetria foi gerado o mapa de declividades da bacia, apresentado na Figura 12. O valor médio observado na bacia foi de 7%, embora próximo à rede de drenagem, nos vales,

sejam observadas declividades variando de 10% a 20%. Localmente, nas regiões de cabeceira e também próximo à confluência do arroio Taboão com o arroio do Rincão, são observadas declividades mais acentuadas, variando de 30% a 50% em alguns pontos.

Figura 12. Declividade da bacia hidrográfica do arroio Taboão.



(Fonte: própria da autora.)

A classificação do relevo, segundo as classes de declividade da EMBRAPA (EMBRAPA, 1979) é apresentada na Tabela 2. A partir desta, verifica-se que a maior parcela da bacia, cerca de 74% da área total, é caracterizada por um relevo que varia de suave-ondulado a ondulado. As demais áreas da bacia são caracterizadas por um relevo plano, e uma pequena parcela (inferior a 2%) é enquadrada como forte-ondulado e montanhoso.

Tabela 2. Classes de relevo na bacia hidrográfica do arroio Taboão.

Classe	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
Plano (0% - 3%)	19,80	25,55%
Suave-ondulado (3% - 8%)	23,36	30,15%
Ondulado (8% - 20%)	33,72	43,51%
Forte-ondulado (20% - 45%)	0,61	0,79%
Montanhoso (45% - 75%)	0,01	0,01%
Total	77,49	100,00%

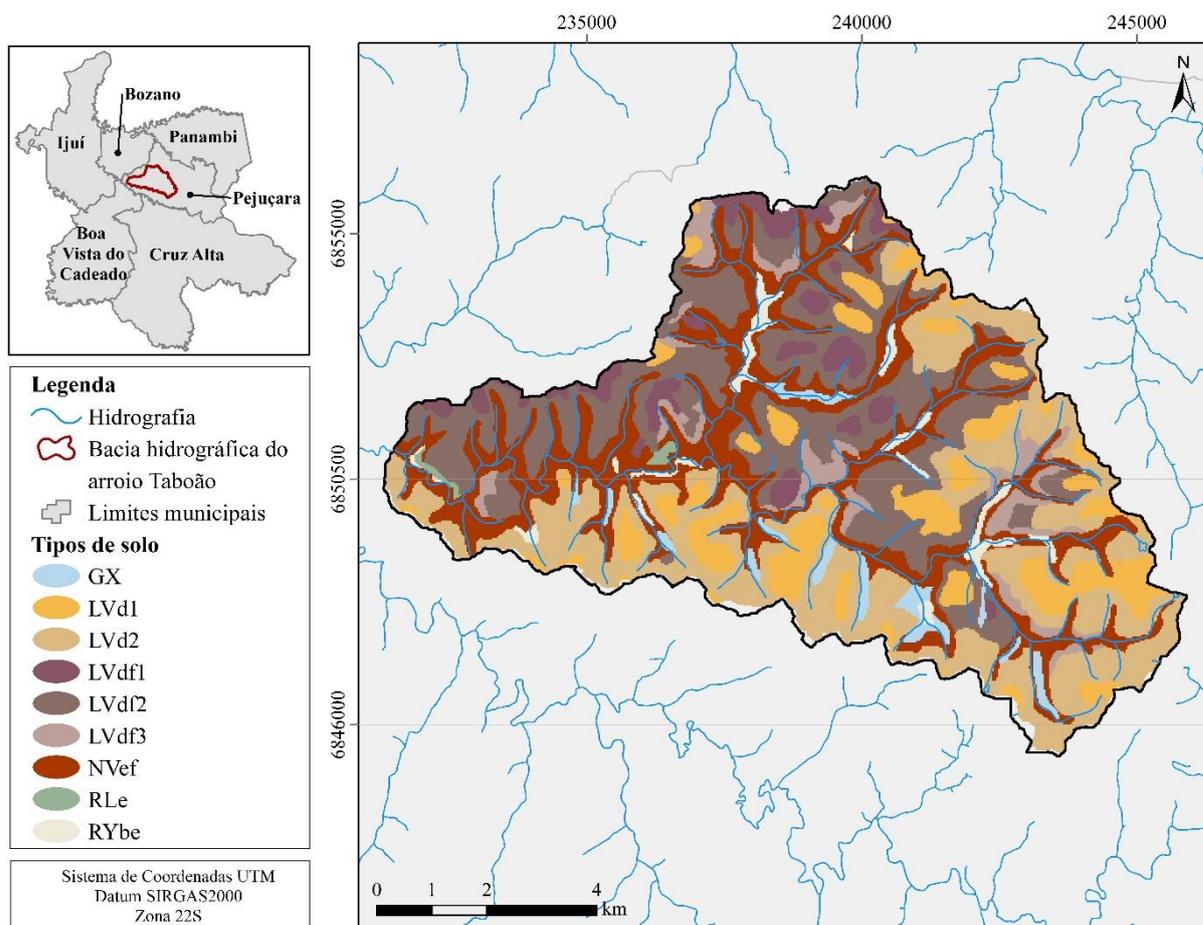
(Fonte: própria da autora.)

### 4.2.3. Pedologia

A área em estudo está localizada no noroeste do Rio Grande do Sul, e insere-se no contexto geológico da Província da Bacia do Paraná, que ocupa uma superfície de 1.400 km<sup>2</sup> em quatro países: Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina. A ocorrência de extrusões de lava subaérea diretamente sobre as formações pré-existentes de arenito Botucatu foi o que deu origem à sequência vulcânica conhecida como Formação Serra Geral, na qual a bacia hidrográfica do arroio Taboão encontra-se (VIEIRO, 2004; CPRM, 2010). Por estes fatores, a textura dos solos da região é caracterizada predominantemente como argilosa, composta por cerca de 70% de argila, 18% de silte e 12% de areia (BRASIL, 1973 *apud* SARI, 2017).

O mapa pedológico da área foi obtido através de levantamento realizado por Carvalho et al. (1990), elaborado na escala 1:25.000. O mapa foi reclassificado por Vieiro (2004) e, posteriormente, por Depiné (2014). Os arquivos em formato digital utilizados no presente trabalho, que contém informações espacializadas sobre os tipos de solo da bacia do arroio Taboão, foram obtidos de Sari (2017). Foram identificadas seis unidades de mapeamento de solos, segundo indicado por Sari (2017): Neossolo Flúvico Tb Eutrófico (RYbe), Neossolo Litólico Eutrófico (RLe), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf), Nitossolo Vermelho Eutroférico (NVef) e Gleissolo Háptico (GX). Na Figura 13 são ilustrados os tipos de solo presentes na bacia hidrográfica do arroio Taboão.

Figura 13. Pedologia da bacia hidrográfica do arroio Taboão.



(Fonte: própria da autora.)

Os Neossolos Flúvicos (RYbe) são solos com argila de atividade baixa e saturação por bases alta na maior parte do horizonte C, dentro de até 120 cm a partir da superfície do solo (EMBRAPA, 2018). Ocorrem normalmente em áreas de baixo declive, e na bacia hidrográfica do arroio Taboão estão localizados principalmente em regiões marginais aos cursos d'água, presentes em 2,4% da área total. Já os Neossolos Litólicos (RLe) também possuem alta saturação por bases, normalmente encontrados em áreas mais declivosas, estando localizados na bacia em duas parcelas associadas à vegetação subtropical, representando 0,34% da área total.

Os Latossolos Vermelhos Distróficos (LVd1, LVd2) são característicos de áreas de relevo suave ondulado, e por apresentarem alta porosidade e boa permeabilidade, naturalmente são solos bastante resistentes à erosão (SARI, 2017). Na bacia hidrográfica do arroio Taboão, estão localizados principalmente nas regiões de cabeceira, representando 37,3% da área total.

Da mesma forma, os Latossolos Vermelhos Distroféricos (LVdf1, LVdf2, LVdf3) também apresentam elevada resistência à erosão, sendo encontrados tanto em áreas de relevo suave, como no meio das encostas e até mesmo nas áreas de declive acentuado; sua presença na bacia do Taboão representa 34,1% da área total.

O Nitossolo Vermelho (NVef) geralmente ocorre em relevos de declividade que variam entre 8-15%, e na bacia do arroio Taboão está localizado próximo à rede de drenagem, correspondendo a 23,5% da área total. Caso não manejados corretamente, apresentam altos riscos de erosão (SARI, 2017). Já o Gleissolo Háptico (GX) é comumente encontrado em terrenos baixos, muito próximo às áreas que margeiam a rede de drenagem, e caracteriza-se pela baixa profundidade e más condições de drenagem. Na bacia hidrográfica do arroio Taboão, é localizado em 2,3% da área.

#### 4.2.4. Uso e ocupação do solo

A partir de imagens das bandas 2, 3 e 4 do satélite LANDSAT TM, Depiné (2014) identificou sete diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do arroio Taboão, indicados na Tabela 3. É possível observar que mais de 88% da área total da bacia tem seu solo ocupado por agricultura, sendo esta extensiva com predomínio de práticas de cultivo do tipo plantio direto. Nestas áreas, os cultivos mais comuns no período de verão são a soja e o milho, enquanto no inverno predominam o trigo e a aveia (SARI, 2017). A aplicação de fertilizantes, pesticidas e fungicidas, bem como a utilização de maquinário pesado, são práticas comuns na região (VIEIRO, 2004).

Tabela 3. Uso do solo na bacia hidrográfica do arroio Taboão.

Uso	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
Agricultura	68,69	88,65%
Água	0,05	0,06%
Área urbana	1,68	2,17%
Benfeitoria*	0,11	0,14%
Campo	0,14	0,18%
Estrada	1,09	1,40%
Mata	5,73	7,40%
Total	77,49	100,00%

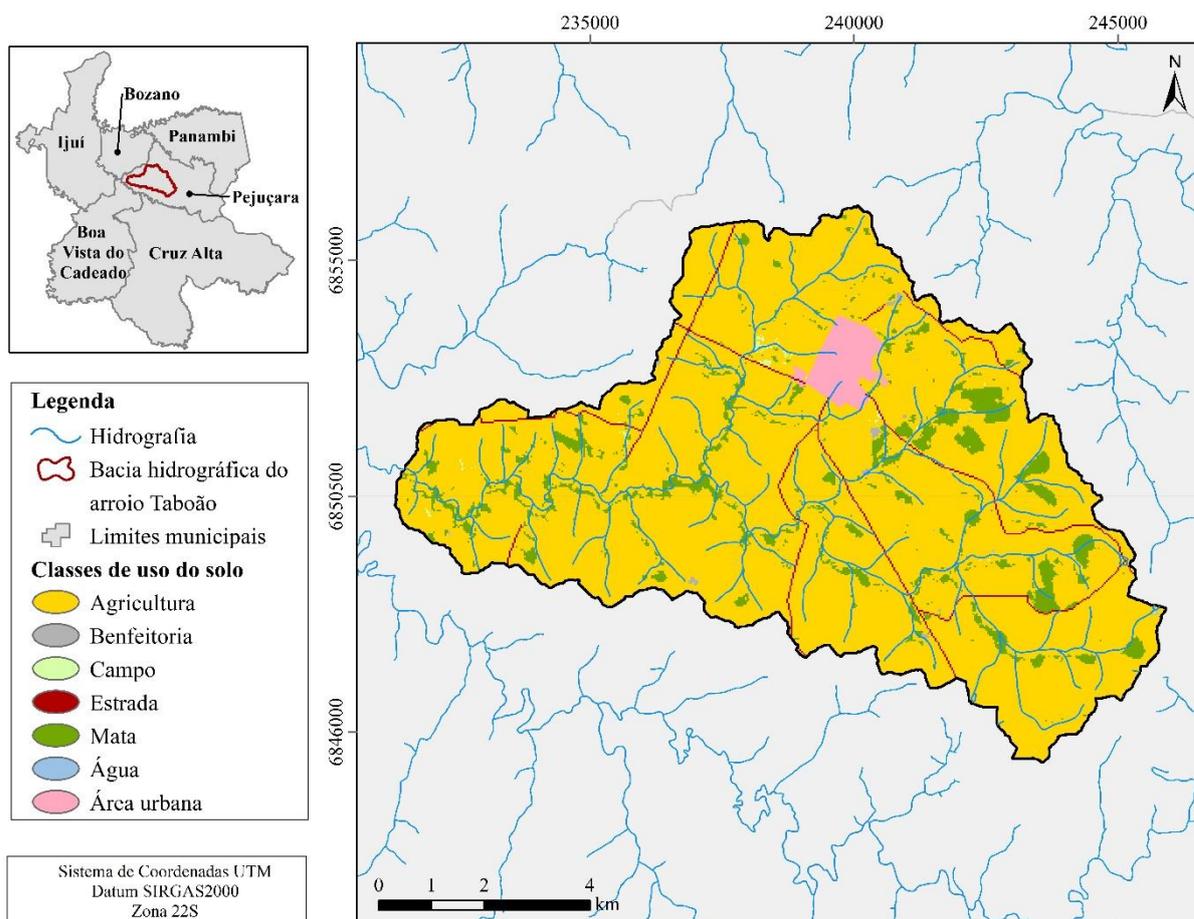
\*Classe de uso que inclui silos, praças públicas, áreas de recreação, etc.

(Fonte: própria da autora.)

A mancha urbana observada é referente à Pejuçara, única sede municipal situada na bacia hidrográfica do arroio Taboão. O município possui uma área de aproximadamente 414 km<sup>2</sup>, englobando totalmente a bacia do Taboão em seus limites. Segundo dados do último Censo Demográfico, a população residente em Pejuçara é de 3.973 habitantes, sendo 67,3% destes em zona urbana e 32,7% em zona rural (IBGE, 2010).

As estradas que cruzam a bacia hidrográfica representam 1,4% da área total, sendo os principais trechos rodoviários referentes à ERS-553, ERS-526 e ERS-512. A utilização do solo para campos e pastagens é pouco expressiva na bacia, representando menos de 0,2% da área. A Figura 14 ilustra os usos do solo na bacia do arroio Taboão, cujos arquivos digitais contendo as informações supracitadas foram obtidos de Sari (2017).

Figura 14. Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do arroio Taboão.



(Fonte: própria da autora.)

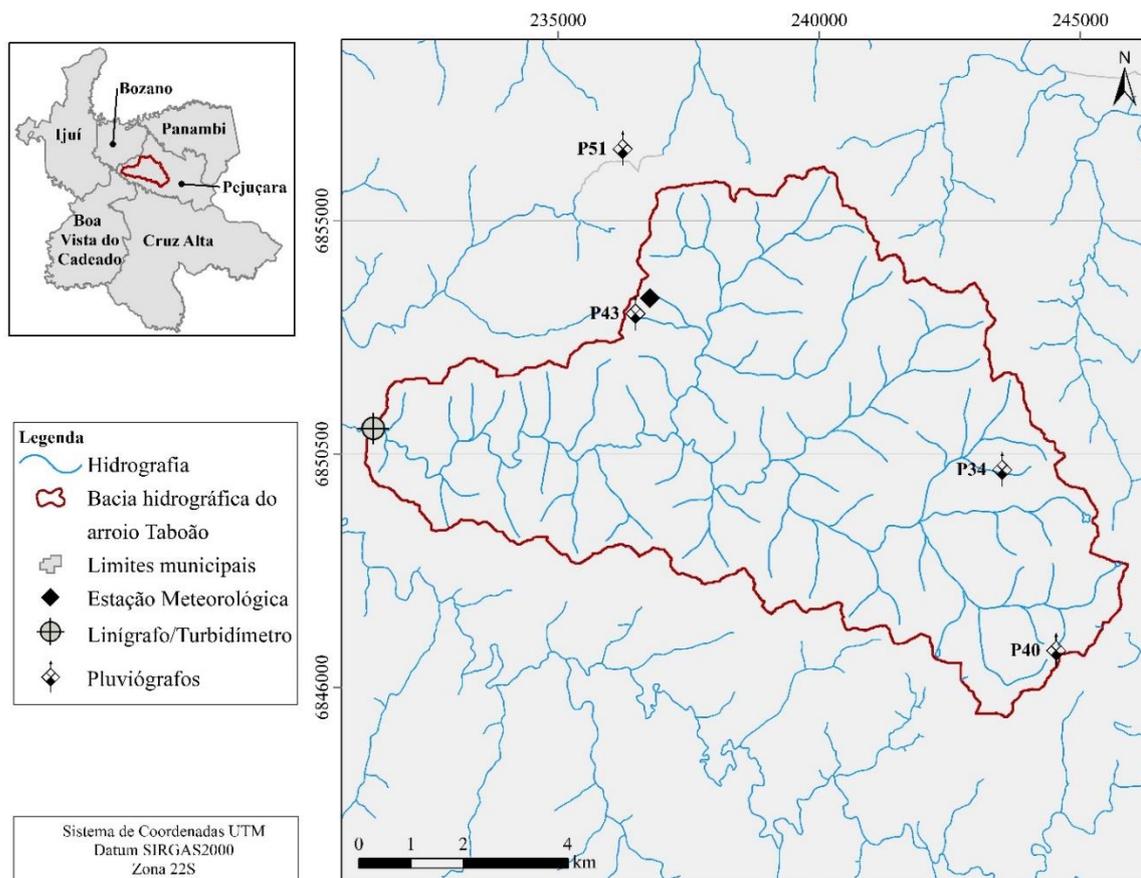
## 4.2.5. Banco de dados utilizado

### 4.2.5.1. Dados de precipitação e clima

Os dados de precipitação utilizados no presente trabalho foram obtidos a partir de quatro pluviômetros do tipo balsa instalados no interior da bacia hidrográfica do Taboão (P34, P40, P43 e P51). Tais postos possuem registros horários de precipitação para o período de 01 de setembro de 1989 a 31 de dezembro de 2016, disponibilizados para utilização por Sari (2017).

A Figura 15 ilustra a localização dos pluviômetros na bacia. Já a Tabela 4 apresenta os parâmetros relacionados à precipitação requeridos pelo modelo SWAT, para uma escala mensal, e que foram calculados através da média dos valores diários de precipitação dos quatro pluviômetros, para todo o período com dados disponíveis – 27 anos. Apesar da série extensa de precipitação, como entrada para o modelo foram utilizados dados horários para o período de 2008 a 2016, dos quatro pluviômetros disponíveis.

Figura 15. Localização dos pontos de monitoramento na bacia do arroio Taboão.



(Fonte: própria da autora.)

Tabela 4. Dados mensais relativos à precipitação requeridos pelo modelo SWAT.

Mês	Variáveis do modelo climático*						
	PCPMM	PCPSTD	PCPSKW	PCPD	RAINHHMX	PR_W1	PR_W2
Janeiro	160,64	11,66	1,24	26,73	29,91	0,357	0,795
Fevereiro	117,01	9,88	2,15	25,27	23,08	0,299	0,804
Março	115,42	8,76	0,74	25,59	24,15	0,300	0,775
Abril	133,00	10,40	0,32	24,50	29,31	0,332	0,755
Mai	143,36	15,65	2,19	27,32	38,97	0,305	0,798
Junho	134,18	10,90	-0,09	24,27	27,53	0,341	0,786
Julho	127,03	9,35	0,22	25,91	28,92	0,296	0,754
Agosto	99,97	8,68	2,07	23,68	27,18	0,304	0,716
Setembro	157,83	13,76	0,78	24,36	31,96	0,378	0,699
Outubro	212,22	14,03	1,88	23,77	34,95	0,361	0,749
Novembro	132,50	10,62	1,09	23,77	26,64	0,295	0,677
Dezembro	151,65	12,03	0,89	25,14	32,51	0,409	0,705

\*Foi mantida a nomenclatura das variáveis originais empregadas no modelo SWAT. Para detalhes, consultar as definições apresentadas na lista de siglas.

(Fonte: própria da autora, elaborada a partir de dados disponibilizados por Sari (2017).)

Assim como a precipitação, dados climáticos também foram utilizados como base para a simulação. Estes foram obtidos da estação climatológica Cruz Alta (código 02853005), gerenciada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), cuja localização é ilustrada na Figura 15. A estação possui séries históricas diárias de temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar, sendo os dados de 01 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2016 o período utilizado no presente estudo.

Além disso, assim como os dados de precipitação, também são necessários parâmetros climáticos médios mensais requeridos pelo modelo SWAT, como entrada de um gerador climático próprio. Estes foram calculados a partir de dados disponibilizados por Depiné (2014), para um período de 22 anos – iniciando em 01 de janeiro de 1989 e terminando em 31 de dezembro de 2011, oriundos da estação do INMET supracitada. A Tabela 5 apresenta os parâmetros climáticos médios calculados para a bacia hidrográfica do arroio Taboão.

Tabela 5. Dados mensais relativos à temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, requerido pelo modelo SWAT.

Mês	Variáveis do modelo climático*						
	TMPMX	TMPMN	TMPSTDMX	TMPSTDMN	SOLARAV	DEWPT	WDAV
Janeiro	29,22	19,21	3,26	3,25	23,59	19,14	1,59

Mês	Variáveis do modelo climático*						
	TMPMX	TMPMN	TMPSTDMX	TMPSTDMN	SOLARAV	DEWPT	WNDVAV
Fevereiro	28,33	18,62	3,36	2,97	22,12	19,14	1,75
Março	27,70	17,88	3,73	3,22	19,48	18,55	1,73
Abril	24,90	15,07	4,31	4,03	14,20	15,79	1,67
Maio	20,91	11,94	4,47	4,14	10,98	12,84	1,59
Junho	19,65	10,14	4,13	4,12	7,27	11,79	1,68
Julho	18,43	8,93	4,94	4,42	9,21	10,14	1,79
Agosto	21,07	10,33	4,91	4,32	11,24	11,37	1,82
Setembro	22,02	11,42	4,30	3,61	13,30	12,60	2,00
Outubro	25,02	13,99	3,49	2,82	14,96	15,08	2,07
Novembro	27,64	15,62	3,33	2,79	21,81	15,76	2,05
Dezembro	29,63	17,98	3,14	2,39	23,80	17,80	1,88

\*Foi mantida a nomenclatura das variáveis originais empregadas no modelo SWAT. Para detalhes, consultar as definições apresentadas na lista de siglas.

(Fonte: própria da autora, elaborada a partir de dados disponibilizados por Depiné, 2014.)

#### 4.2.5.2. Dados de vazão

Os dados de vazão utilizados no presente estudo foram obtidos através do monitoramento do nível d'água no exutório do arroio Taboão, realizado por meio de um linígrafo com discretização de medição de 10 minutos. A localização do instrumento na área de estudo é ilustrada na Figura 15. Os dados oriundos do monitoramento realizado na bacia foram disponibilizados por Sari (2017), englobando o período de 2008 a 2016, totalizando nove anos de informações relativas à vazão no exutório do curso d'água.

Foram calculadas as médias diária e mensal dos níveis d'água medidos, e estes valores então aplicados à curva-chave de vazões desenvolvida para a bacia do Taboão, cujas equações são apresentadas a seguir (Equação 6 e Equação 7). As equações que relacionam nível e vazão foram elaboradas pela equipe do Projeto Potiribu a partir de monitoramento realizado *in situ* na bacia durante nove anos.

$$Q = 0,0015 \cdot N^{1,7298}, \text{ para } N \leq 50 \text{ cm} \quad \text{Equação 6}$$

$$Q = (10^{-5} \cdot N^2) + (0,0699 \cdot N) - 2,3813, \text{ para } N > 50 \text{ cm} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Q é a vazão em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; e

N é o nível d'água em cm.

#### 4.2.5.3. Dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS)

Para a obtenção das séries de concentração de sedimentos em suspensão (CSS), foram utilizados dados provenientes de monitoramento realizado no exutório do arroio Taboão, através da utilização de um sensor de turbidez – ou turbidímetro – que armazena leituras a cada 10 minutos. Para possibilitar a correlação dos dados de turbidez medidos com a CSS, foram realizadas campanhas amostrais por Sari (2017) em períodos distintos na bacia, nas quais utilizaram-se amostradores de sedimento dos tipos DH-48 e DH-59.

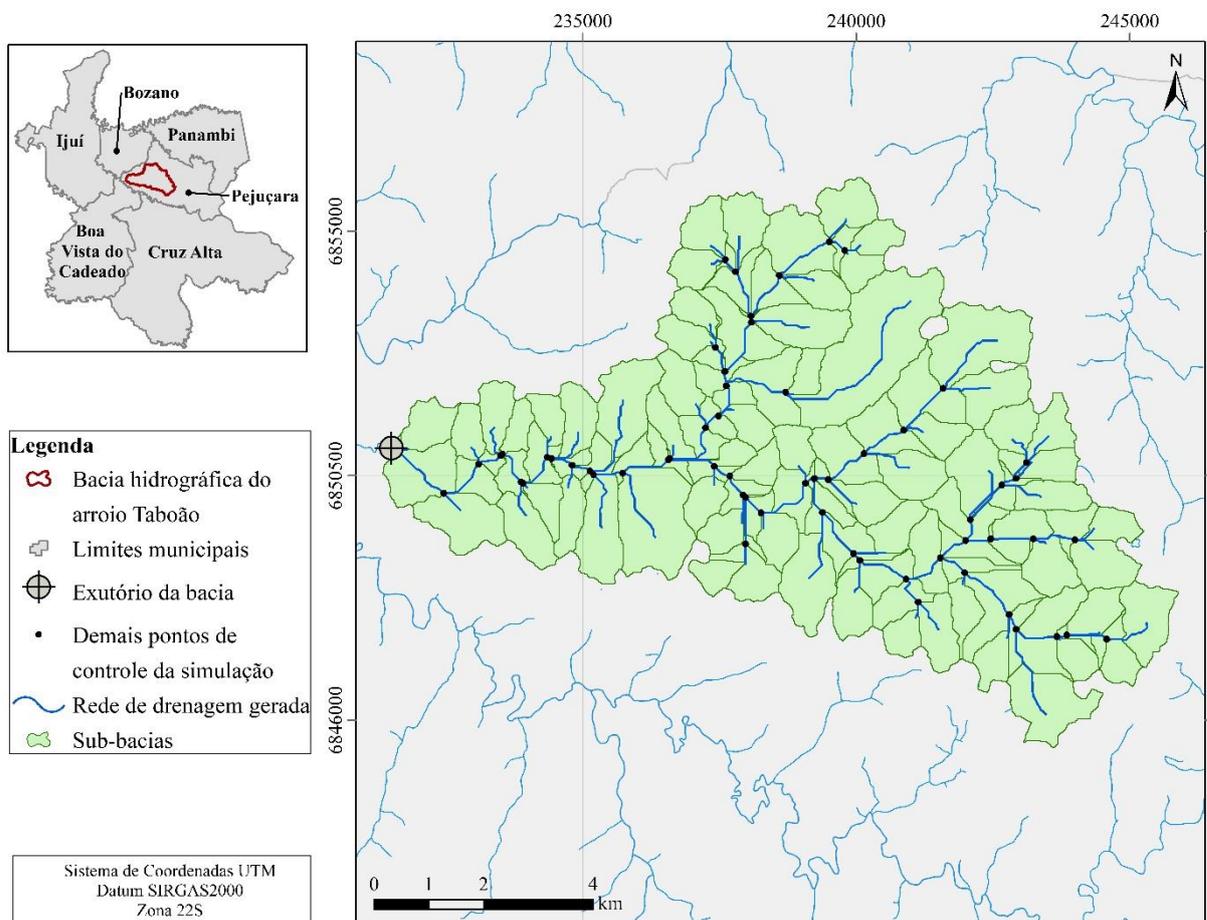
Através da correlação entre os dados de níveis d'água e turbidez, associados aos valores obtidos nas campanhas de coleta de sedimentos, foi possível obter uma série contínua de concentração de sedimentos em suspensão, disponibilizada por Sari (2017). Devido a problemas com o equipamento de medição de turbidez, a série possui três anos de extensão e engloba o período de 2013 a 2015. A Figura 15 citada anteriormente ilustra a localização do turbidímetro na bacia do arroio Taboão.

### 4.3 SIMULAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA COM O MODELO SWAT

A utilização do modelo *Soil and Water Assessment Tools* para a simulação de processos hidrossedimentológicos é diretamente relacionada a disponibilidade de três tipos de informações na área de aplicação: dados espaciais; climáticos e hidrológicos; e características físicas e físico-hídricas dos solos. Os dados espaciais são compostos pelo Modelo Numérico de Terreno (MNT), tipos de solo e uso do solo. Os dados climáticos e hidrológicos englobam as séries de precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, além dos dados observados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão – necessários para a verificação da qualidade da simulação. Por fim, as características físicas e físico-hídricas do solo podem ser obtidas através de ensaios de campo realizados na área de estudo, ou estimadas através de informações provenientes da bibliografia.

Para iniciar a aplicação do modelo na bacia hidrográfica do arroio Taboão, a primeira informação inserida foi o MNT. A partir dele, gerou-se a direção e a acumulação de fluxo, o que posteriormente resultou na rede de drenagem. A partir da hidrografia, posicionou-se o ponto do exutório da bacia no mesmo local onde se encontra o linígrafo e o turbidímetro de monitoramento *in situ*. A partir disso, o modelo delimitou a área de contribuição até o exutório e áreas parciais – totalizando 121 sub-bacias. A Figura 16 ilustra as informações supracitadas.

Figura 16. Bacia, sub-bacias, rede de drenagem e pontos de controle gerados para a simulação com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do arroio Taboão.

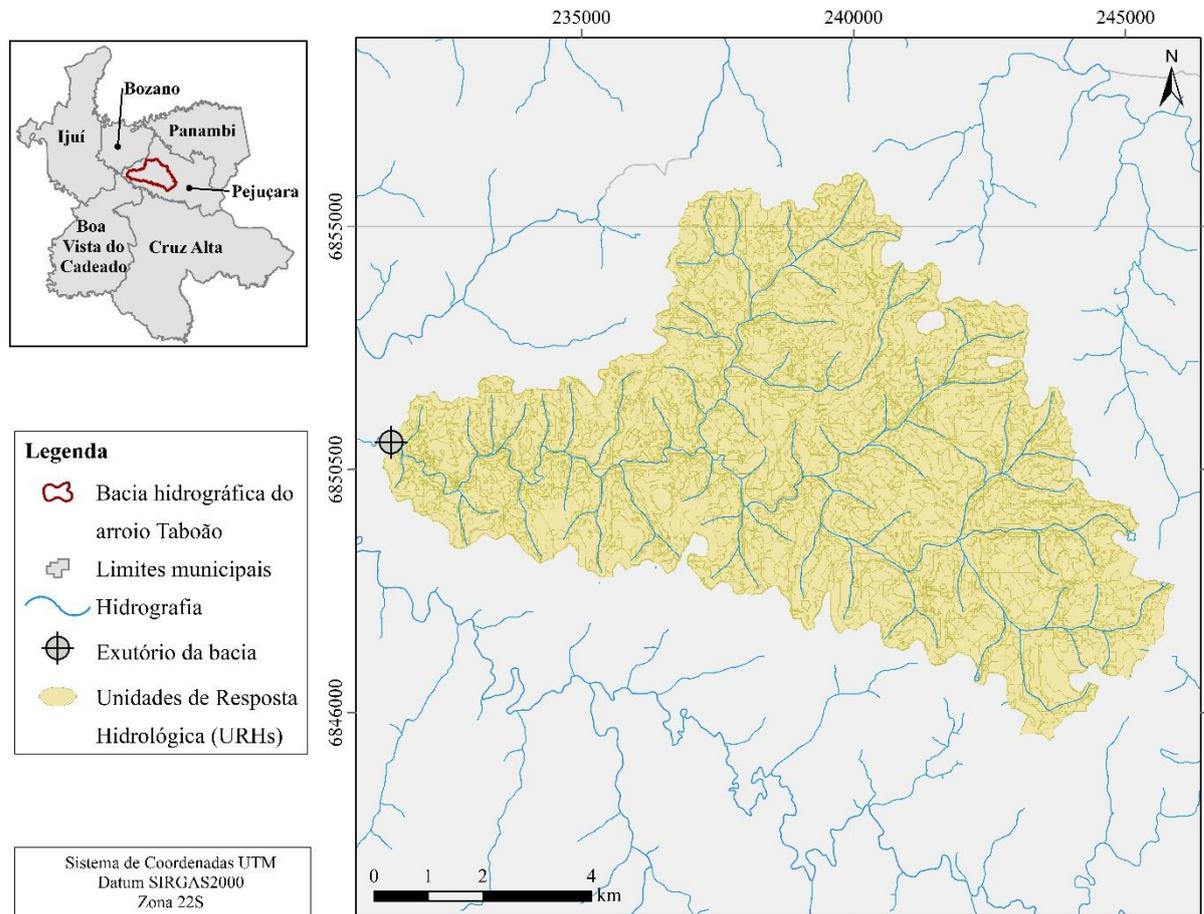


(Fonte: própria da autora.)

A seguir, os dados de uso do solo, tipo de solo e as declividades da bacia foram inseridas. Estes dados foram classificados no modelo conforme apresentado anteriormente nos itens 4.2.2 até 4.2.4. A partir da sobreposição destas três camadas espaciais, iniciou-se a geração

das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). Ao todo, foram geradas 1107 URHs, ilustradas na Figura 17 a seguir.

Figura 17. Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) geradas para a simulação com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do arroio Taboão.



(Fonte: própria da autora.)

Finalizado os processos decorrentes dos dados espaciais, iniciou-se a inserção dos dados climáticos e hidrológicos. O banco de dados climáticos, de inserção obrigatória para a simulação, foi criado com base nos valores médios mensais apresentados anteriormente no item 4.2.5.1. As séries de precipitação horárias dos quatro pluviômetros disponíveis também foram inseridas, bem como as séries diárias dos dados de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento, referentes a estação climática de Cruz Alta. Este processo finaliza a criação do módulo hidrometeorológico do modelo.

Por fim, foram adicionadas e alteradas algumas informações contidas nos bancos de dados do modelo. Quanto à pedologia, procedeu-se a inserção das características físico-químicas de

cada um dos tipos de solo observados na bacia, segundo informações de Depiné (2014) e Sari (2017), apresentadas na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6. Algumas das características físicas dos solos da bacia do arroio Taboão inseridas no modelo SWAT.

Parâmetros do solo*	Tipos de solo da bacia								
	LVd1	LVd2	LVdf1	LVdf2	LVdf3	NVef	RYbe	GX	RLe
NLAYERS	4	4	4	4	4	3	4	4	4
HYDGRP	A	A	B	B	B	B	B	B	B
SOL_ZMX	3000	3000	3500	3500	3500	3500	3500	3000	3000
ANION_EXCL	0,38	0,38	0,38	0,38	0,50	0,32	0,37	0,50	0,33
SOL_Z <sup>1</sup>	250	250	300	300	300	300	250	180	230
SOL_BD <sup>1</sup>	1,64	1,64	1,62	1,71	1,31	1,73	1,28	1,52	1,37
SOL_AWC <sup>1</sup>	0,60	0,60	0,92	0,67	0,97	0,40	0,73	0,85	1,00
SOL_CBN <sup>1</sup>	1,08	1,08	1,31	2,26	1,72	1,30	1,70	2,35	1,70
SOL_K <sup>1</sup>	195	195	161	65	41	265	101	145	161
CLAY <sup>1</sup>	51,3	51,3	59,2	43,5	60,5	59,9	47,3	44,8	35
SILT <sup>1</sup>	15,3	15,3	23,3	2,7	21,0	21,4	24,4	22,5	12,0
SAND <sup>1</sup>	33,4	33,4	17,5	33,8	18,5	18,7	28,0	32,7	48,0
ROCK <sup>1</sup>	0	0	0	0	0	0	0,3	0	5,0
SOL_ALB <sup>1</sup>	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23	0,18	0,16	0,16	0,16
USLE_K <sup>1</sup>	0,0967	0,0967	0,1129	0,1091	0,1045	0,1057	0,1097	0,1082	0,1049
SOL_Z <sup>2</sup>	700	700	1000	1000	1000	900	1000	600	1000
SOL_BD <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,52	1,63	1,29	1,62	1,27	1,47	1,55
SOL_AWC <sup>2</sup>	0,80	0,80	0,92	0,67	0,95	0,60	0,75	0,60	1,00
SOL_CBN <sup>2</sup>	1,18	1,18	1,00	1,55	1,30	0,68	1,43	0,54	0,54
SOL_K <sup>2</sup>	202	202	100	50	40	126	48	69	31
CLAY <sup>2</sup>	64,9	64,9	70,0	65,0	56,0	70,2	57,7	47,3	46,5
SILT <sup>2</sup>	11,0	11,0	14,7	16,0	23,0	16,4	24,5	22,6	12,7
SAND <sup>2</sup>	24,1	24,1	15,3	18,5	21,0	13,3	16,8	29,8	30,8
ROCK <sup>2</sup>	0	0	0	0,5	0	0,1	1,0	2,2	10,0
SOL_ALB <sup>2</sup>	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23	0,15	0,16	0,16	0,16
USLE_K <sup>2</sup>	0,1055	0,1055	0,1212	0,1106	0,1176	0,1246	0,1108	0,1389	0,1223
SOL_Z <sup>3</sup>	1500	1500	2000	2000	2000	3500	2000	1500	2000
SOL_BD <sup>3</sup>	1,47	1,47	1,52	1,50	1,29	1,49	1,19	1,37	1,75
SOL_AWC <sup>3</sup>	0,70	0,70	1,00	0,84	0,88	0,60	0,35	0,61	1,00
SOL_CBN <sup>3</sup>	0,72	0,72	0,54	0,95	1,08	0,40	1,43	0,27	1,30
SOL_K <sup>3</sup>	150	150	77	30	19	143	0,45	78	31
CLAY <sup>3</sup>	68,1	68,1	72,3	48,9	56,6	78,0	57,2	54,4	37,6

Parâmetros do solo*	Tipos de solo da bacia								
	LVd1	LVd2	LVdf1	LVdf2	LVdf3	NVef	RYbe	GX	RLe
SILT <sup>3</sup>	11,9	11,9	16,5	29,6	22,4	12,0	21,3	18,9	17,1
SAND <sup>3</sup>	20,0	20,0	11,2	21,5	21,0	10,0	21,5	26,7	35,3
ROCK <sup>3</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	10
SOL_ALB <sup>3</sup>	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23	0,15	0,16	0,16	0,16
USLE_K <sup>3</sup>	0,1117	0,1117	0,1351	0,147	0,1258	0,1252	0,1146	0,1332	0,1349
SOL_Z <sup>4</sup>	3000	3000	3500	3500	3500	-	3500	3000	3000
SOL_BD <sup>4</sup>	1,37	1,37	1,70	1,47	1,28	-	1,19	1,37	1,40
SOL_AWC <sup>4</sup>	0,75	0,75	1,00	0,94	0,93	-	0,35	0,61	1,00
SOL_CBN <sup>4</sup>	0,54	0,54	0,45	0,63	0,86	-	1,43	0,27	0,54
SOL_K <sup>4</sup>	159	159	87	34	21	-	0,45	78	31
CLAY <sup>4</sup>	68,0	68,0	71,4	48,5	56,6	-	57,2	54,4	37,6
SILT <sup>4</sup>	12,0	12,0	15,7	29,6	22,4	-	21,3	17,9	17,1
SAND <sup>4</sup>	20,0	20,0	11,2	21,9	21,0	-	21,5	27,7	35,3
ROCK <sup>4</sup>	0	0	1,7	0	0	-	0	0	10
SOL_ALB <sup>4</sup>	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23	-	0,16	0,16	0,16
USLE_K <sup>4</sup>	0	0	0	0	0	-	0	0	0

<sup>1</sup> Refere-se as propriedades da primeira camada de solo (Soil Layer 1); <sup>2</sup> Refere-se as propriedades da segunda camada de solo (Soil Layer 2); <sup>3</sup> Refere-se as propriedades da terceira camada de solo (Soil Layer 3); e <sup>4</sup> Refere-se as propriedades da quarta camada de solo (Soil Layer 4);

\*Foi mantida a nomenclatura das variáveis originais empregadas no modelo SWAT. Para detalhes, consultar as definições apresentadas na lista de siglas.

(Fonte: adaptado de Depiné (2014) e Sari (2017).)

Os parâmetros relativos ao uso do solo, para as classes apresentadas no item 4.2.4, foram mantidos *default* do modelo, pois seus valores padrão já se adequavam aos usos observados na bacia. Visando representar a rotação de culturas existente na área de estudo, adicionou-se o plantio e colheita de soja e trigo como um modo de operação agrícola do modelo. O plantio da soja (SOY) tem início em 07 de novembro e colheita em 28 de abril, caracterizando-se como uma cultura de verão. Já o plantio do trigo (WHEAT) inicia-se em 05 de junho com colheita programada para 29 de outubro, apresentando-se como cultura de inverno. As informações relativas à sucessão de culturas na bacia foram obtidas de Sari (2017).

Por fim, a última etapa de montagem do modelo envolveu a escolha dos métodos a serem utilizados durante a simulação hidrossedimentológica. Para isto, foram utilizadas as metodologias indicadas a seguir:

- Método de infiltração de Green & Ampt, utilizado no cálculo da geração de escoamento superficial. Requer dados sub-diários de precipitação;
- Método de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração. Requer dados diários de temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar;
- Método da Acumulação Variada para propagação da descarga líquida ao longo da rede de drenagem;
- Equação de Bagnold para o cálculo do transporte de sedimentos no módulo de canal, além da estimativa de processos hidrossedimentológicos atuantes na rede de drenagem, como agitação e degradação; e
- *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) para estimativa da erosão do solo e produção de sedimentos nas vertentes da bacia.

Finalizados os procedimentos de montagem do modelo para a simulação na bacia hidrográfica do arroio Taboão, foram definidos os períodos a serem utilizados para aquecimento e as métricas de avaliação dos resultados a serem aplicados nas etapas de calibração e validação da modelagem. As informações supracitadas são apresentadas, respectivamente, nos itens 4.3.1 e 4.3.2 a seguir.

#### **4.3.1. Aquecimento do modelo SWAT**

A definição do período de aquecimento no modelo se dá através da variável NYSKIP, que representa a quantidade de tempo utilizada pelo modelo como um período de equilíbrio, e que não retornará os valores dos resultados simulados. Para simulações com 30 anos ou mais, a utilização de um período de aquecimento é opcional. Já para simulações com séries menos extensas, é recomendado que seja utilizado, no mínimo, 2 anos para equilíbrio das condições iniciais (NEITSCH et al., 2009).

O valor padrão (*default*) da variável NYSKIP no modelo é 0. No presente trabalho, são avaliados três diferentes cenários: o primeiro com a utilização de 2 anos como período de

aquecimento (NYSKIP = 2), sendo posteriormente utilizado o restante da série para calibração e validação.

O segundo cenário, com 1 ano de período de aquecimento (NYSKIP = 1), onde para o ano excedente da série foram aplicadas as métricas de validação. E por fim, o terceiro cenário, sem período de aquecimento (NYSKIP = 0), onde foram aplicadas métricas de validação para os dois anos excedentes da série. A calibração permaneceu a obtida para o primeiro cenário, com 2 anos de aquecimento.

### 4.3.2. Calibração e validação do modelo SWAT

Para avaliar a qualidade dos resultados simulados, foram aplicadas métricas de desempenho, tanto no período de calibração quanto na etapa de validação. As métricas utilizadas foram baseadas no indicado por Moriasi et al. (2007), e são apresentadas a seguir:

- Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE): é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variação residual (ruídos) comparada a variação dos dados medidos (observados). Os valores de NSE variam entre  $-\infty$  e 1 (inclusive), sendo  $NSE = 1$  o valor ideal (MORIASI et al., 2007). O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode ser calculado a partir da Equação 8 apresentada a seguir.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{medio})^2} \right] \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$Y_i^{obs}$  é a i-ésima observação da variável em análise;

$Y_i^{sim}$  é a i-ésima simulação da variável em análise;

$Y^{medio}$  é a média do conjunto de valores observados em análise; e

$n$  é o número total de valores analisados.

- Porcentagem bias (PBIAS): coeficiente que mensura a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores do que os dados observados. O valor ótimo para

o coeficiente é  $PBIAS = 0$ ; quanto mais baixo seu valor absoluto, mais adequada é a simulação realizada pelo modelo (MORIASI et al., 2007). Valores de  $PBIAS > 0$  expressam que os resultados simulados estão subestimados em relação aos dados observados, já valores de  $PBIAS < 0$  indicam uma superestimativa dos dados simulados em relação aos observados. O coeficiente PBIAS pode ser calculado através da Equação 9.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$Y_i^{obs}$  é a i-ésima observação da variável em análise; e

$Y_i^{sim}$  é a i-ésima simulação da variável em análise.

- Coeficiente de desvio padrão das observações (RSR): é uma taxa calculada através da razão entre a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o desvio padrão dos dados observados ( $STDEV_{obs}$ ). O coeficiente RSR varia do valor ótimo de 0 – o que indica que RMSE ou a variação residual são nulos – até elevados valores positivos. Quanto menor for o coeficiente de desvio padrão das observações (RSR), por consequência menor é o erro quadrático médio, o que indica uma melhor performance do modelo (MORIASI et al., 2007). O coeficiente RSR pode ser calculado através da Equação 10.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[ \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \gamma^{medio})^2}} \right] \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$Y_i^{obs}$  é a i-ésima observação da variável em análise;

$Y_i^{sim}$  é a i-ésima simulação da variável em análise;

$\bar{Y}^{\text{médio}}$  é a média do conjunto de valores observados em análise; e

$n$  é o número total de valores analisados.

A Tabela 7 a seguir apresenta as classificações de desempenho das métricas estatísticas consideradas neste estudo, para simulações com passo de tempo mensal.

Tabela 7. Valores das métricas estatísticas consideradas e seus respectivos índices de desempenho para simulações com passo de tempo mensal.

Coeficientes de desempenho considerados		Índices de desempenho do modelo			
		Muito bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório
Nash-Sutcliffe (NSE)	Moriasi et al. (2007)	$0,75 < \text{NSE} \leq 1,0$	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$	$0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$	$\text{NSE} \leq 0,50$
	Van Liew et al. (2007)	$\text{NSE} \geq 0,75$		$0,36 \leq \text{NSE} < 0,75$	$\text{NSE} < 0,36$
Porcentagem bias (PBIAS)	Vazão	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$
	Sedimentos	$\text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 30$	$\pm 30 \leq \text{PBIAS} < \pm 55$	$\text{PBIAS} \geq \pm 55$
Coeficiente de desvio padrão (RSR)		$0,00 \leq \text{RSR} \leq 0,50$	$0,50 < \text{RSR} \leq 0,60$	$0,60 < \text{RSR} \leq 0,70$	$\text{RSR} > 0,70$

(Fonte: adaptado de Moriasi et al. (2007).)

Iniciou-se o procedimento de calibração do modelo através dos processos hidrológicos na bacia. Após a calibração dos dados de vazão ser considerada satisfatória, partiu-se para a calibração da concentração de sedimentos, já que os processos que envolvem o aporte de sedimentos na rede de drenagem estão diretamente conectados à geração de escoamento superficial.

A série de precipitações e dados climáticos, como anteriormente mencionado no item 4.2.5, engloba os anos de 2008 a 2016 (inclusive), totalizando nove anos de dados. Assim, considerando que o período de aquecimento (*warm-up*) do SWAT deve ser de dois anos (NEITSCH et al., 2009), os anos de 2008 e 2009 foram desconsiderados da simulação – não gerando resultados de saída do modelo – e utilizados apenas para a estabilização das condições iniciais.

A série de vazões abrange os anos de 2008 a 2016, totalizando também nove anos de dados. Como os dois primeiros anos da simulação (2008 e 2009) serão utilizados para aquecimento, o período de 2010-2016 foi dividido entre calibração e validação. Desta forma, os anos de 2010-2011 e 2015-2016 foram utilizados para calibração do modelo. Para a etapa de

validação do modelo hidrológico, foram utilizados dois anos da série de vazões – 2012 e 2014. O ano de 2013 foi considerado atípico e seus dados de vazão foram descartados das etapas de análise da simulação.

A série de sedimentos, que abrange os anos de 2013 a 2015 (inclusive), teve dois anos utilizados na calibração – 2013 e 2015. Para a validação da simulação de sedimentos utilizou-se o ano de 2014.

Primeiramente, realizou-se a calibração do módulo hidrológico do modelo, utilizando 2 anos de período de aquecimento; em seguida, procedeu-se sua validação utilizando apenas dois anos da série histórica. Finalizada esta etapa, partiu-se para a calibração do módulo sedimentológico e, finalmente, sua validação.

Então, após realizada a calibração e validação para ambos os módulos do modelo utilizando-se dois anos de período de aquecimento, testaram-se outros dois cenários de simulação: a) utilizando apenas 1 ano de período de aquecimento; e b) não utilizando aquecimento para o modelo. Os dados obtidos para ambos os cenários testados foram englobados aos anos disponíveis para validação dos processos hidrológicos na bacia. A Tabela 8 apresenta uma compilação dos períodos com dados disponíveis e os cenários simulados com o modelo SWAT.

Tabela 8. Períodos utilizados para simulação com o modelo SWAT na bacia do Taboão e respectivos cenários considerados.

Função	2 anos de aquecimento	1 ano de aquecimento	Sem aquecimento
	Período		
Dados de precipitação com entrada horária e dados climáticos com entrada diária	2008 a 2016		
Aquecimento do modelo	2008 e 2009	2008	-
Calibração da vazão	2010-2011, 2015-2016		
Validação da vazão	2012 e 2014	2009, 2012 e 2014	2008-2009, 2012 e 2014
Calibração da produção de sedimentos	2013 e 2015		
Validação da produção de sedimentos	2014		

(Fonte: própria da autora.)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item apresenta os resultados gerados a partir das simulações realizadas com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do arroio Taboão. Primeiro, são apresentados os resultados obtidos para o modelo hidrológico, bem como os parâmetros utilizados na calibração; posteriormente, a modelagem da produção de sedimentos é abordada, onde apresenta-se o desempenho da simulação tanto na etapa de calibração quanto na validação. Por fim, é realizada uma análise do período de aquecimento, no qual são avaliadas diferentes extensões de série utilizadas para estabilização das condições iniciais da modelagem e seu impacto na qualidade dos dados simulados.

### 5.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

A partir da montagem do SWAT para a bacia do arroio Taboão, utilizando os dados apresentados no item 4 do presente trabalho, executou-se uma primeira simulação, com os parâmetros do modelo mantidos em seus valores padrão (*default*). Os resultados obtidos, segundo as métricas de avaliação aplicadas neste estudo, foram NSE de 0,13, PBIAS de 3,94% e RSR de 0,93. Apesar de a simulação apresentar um desempenho “Muito bom” para a porcentagem bias, os valores obtidos dos coeficientes de Nash-Sutcliffe e do desvio padrão indicam desempenho “Insatisfatório” (MORIASI et al., 2007; VAN LIEW et al., 2007). Desta forma, iniciou-se a etapa de calibração dos parâmetros hidrológicos.

Neste estudo, a calibração do modelo SWAT se deu de forma manual, através da utilização da função *Manual Calibration Helper*, que permite ao usuário fazer ajustes em parâmetros calibráveis, sejam eles para todas as URHs e/ou sub-bacias, ou em apenas um grupo específico no qual se desejam realizar alterações. As operações utilizadas no calibrador manual foram a substituição de valores (*Replace Value*) dos parâmetros e também a multiplicação dos parâmetros (*Multiply by*) por um valor determinado.

Tomou-se por base nesta etapa os parâmetros calibráveis utilizados por Depiné (2014), em estudo realizado para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2004 na bacia. Além disso, também se considerou a análise de sensibilidade dos parâmetros em relação à simulação com passo de tempo mensal realizada por Sari (2017). Cabe ressaltar, entretanto, que neste último trabalho a calibração foi executada automaticamente com o auxílio do calibrador automático

SWAT-CUP. Desta forma, a ordem de importância de alguns parâmetros diferiu entre os trabalhos consultados, tendo em vista os diferentes modos de ajustes da simulação aplicados em ambos.

A partir da gama inicial de parâmetros calibráveis sugerida por Depiné (2014), iniciou-se a modificação dos valores *default* indicados no software, baseada na resposta do modelo quanto ao comportamento hidrológico na bacia. Assim, além da avaliação das métricas de desempenho consideradas neste estudo (item 4.3.2), também analisou-se a plotagem do hidrograma observado *versus* o hidrograma simulado ao fim de cada simulação, de forma a verificar visualmente se os resultados representavam adequadamente a evolução temporal e a magnitude dos dados de vazão medidos.

Os ajustes de parâmetros levaram em consideração as recomendações apresentadas no manual do usuário do SWAT, bem como permaneceram na faixa de valores limites propostos no modelo (WINCHELL et al., 2013; ARNOLD et al., 2012). Conforme indicado anteriormente na Tabela 8, o período utilizado para a calibração foram os anos de 2010, 2011, 2015 e 2016. Já para a validação, utilizou-se os anos de 2012 e 2014.

A Tabela 9 a seguir apresenta os parâmetros ajustados para o módulo hidrológico do SWAT, considerando uma simulação com passo de tempo mensal. As métricas de desempenho obtidas para a calibração e validação do modelo são apresentadas na Tabela 10. O coeficiente NSE para a calibração e a validação foi o mesmo, resultando no valor de 0,63. Já a porcentagem bias foi de -10,01% para a calibração e 3,77% para a validação, enquanto que RSR resultou em 0,61 na calibração e 0,60 na validação. Segundo os critérios de desempenho considerados (MORIASI et al., 2007; VAN LIEW et al., 2007), tanto para a calibração quanto na validação, ambos NSE e RSR são considerados “Satisfatórios” enquanto PBIAS é “Bom” na calibração e “Muito bom” na validação.

Tabela 9. Parâmetros e seus respectivos valores calibrados para a simulação do módulo hidrológico do modelo SWAT, considerando passo de tempo mensal.

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valor inicial	Faixa de variação	Valor calibrado
ALPHA_BF	Fator alfa de recessão do fluxo de base (dias <sup>-1</sup> )	0,048	0 – 1,0	0,048
CANMX	Armazenamento máximo de água na copa das árvores (mm)	0	0 – 100,0	10,0
CH_N(1)	Coeficiente “n” de Manning para os canais tributários (-)	0,014	0,01 – 30,0	0,03
CH_N(2)	Coeficiente “n” de Manning para os canais principais (-)	0,014	-0,01 – 0,3	0,03
EPCO	Fator de compensação do crescimento das plantas (-)	1	0 – 1,0	0,65
ESCO	Fator de compensação da evaporação de água do solo (-)	0,95	0 – 1,0	0,05
GW_DELAY	Coeficiente que representa o tempo necessário para a água percolar através do perfil de solo e recarregar o aquífero raso (dias)	31	0 – 500,0	60
GW_REVAP	Coeficiente de movimento da água do aquífero raso para a zona não saturada do solo (-)	0,02	0,02 – 0,20	0,02
GWQMN	Limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra fluxo de base (mm)	1000,0	0 – 5000,0	3000,0
RCHRG_DP	Fração de percolação para o aquífero profundo (fração)	0,05	0 – 1,0	0,05
REVAPMN	Limiar de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação para o aquífero profundo (mm)	750	0 – 1000,0	895,0
SHALLST	Profundidade inicial da água no aquífero raso (mm)	1000,0	0 – 5000,0	3500,0
SOL_AWC	Quantidade de água disponível no solo (mm.mm <sup>-1</sup> ), varia de acordo com as camadas do solo (NLAYERS)	Variável de acordo com o tipo e a camada de solo	0 – 1,0	Acrescido 10% em relação aos valores originais
SURLAG	Coeficiente de atraso do escoamento superficial (dias)	2	0 – 24,0	1

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valor inicial	Faixa de variação	Valor calibrado
SLSOIL	Comprimento do declive para que ocorra fluxo lateral (m)	0	0 – 150,0	0,003
LAT_TTIME	Tempo necessário para o retorno do fluxo lateral (dias)	0	0 – 180,0	31

(Fonte: própria da autora.)

Tabela 10. Métricas de desempenho obtidas para a calibração mensal do módulo hidrológico do modelo SWAT, utilizando 2 anos de período de aquecimento.

Métricas de desempenho	Etapa		Valores mínimos para desempenho “Satisfatório”
	Calibração	Validação	
NSE	0,63	0,63	NSE > 0,5* NSE ≥ 0,36**
PBIAS	-10,01%	3,77%	PBIAS < ±25%
RSR	0,61	0,60	RSR ≤ 0,7

\*Segundo Moriasi et al. (2007); \*\* Segundo Van Liew et al. (2007).

(Fonte: própria da autora.)

A plotagem do hidrograma auxiliou substancialmente no procedimento de calibração, pois através dele foi possível identificar onde a simulação não se assemelhava aos dados medidos, bem como em quais parcelas da série a mesma representava adequadamente os processos hidrológicos atuantes na bacia. Uma análise dos parâmetros utilizados na calibração e a justificativa para a modificação de seus respectivos valores em relação ao *default* do modelo é apresentada a seguir.

- Parâmetros relacionados às águas subterrâneas (*Groundwater input*)

Cerca de 45% dos parâmetros utilizados na calibração estão relacionados às águas subterrâneas da área de estudo. O parâmetro ALPHA\_BF e GW\_REVAP tiveram seus valores calibrados iguais aos valores iniciais da modelagem, pois os parâmetros não se mostraram sensíveis quando modificados sozinhos. O parâmetro GW\_DELAY foi aumentado, de forma a diminuir a quantidade de água armazenada no aquífero e aumentar a contribuição do fluxo lateral. Visando equilibrar a contribuição dos aquíferos raso e profundo, elevou-se o valor do parâmetro GWQMN, o que representa a necessidade de uma maior acumulação de água na zona saturada para que ocorra fluxo de base até a rede de drenagem.

A fração de percolação da zona de raízes para o aquífero profundo (RCHRG\_DP), após algumas modificações, teve seu valor retornado ao original, que representa uma fração de recarga baixa, de 5%. O parâmetro REVAPMN foi elevado, de forma a representar a necessidade de uma maior acumulação de lâmina de água na zona do aquífero raso para que ocorra percolação até o aquífero profundo. Por fim, o parâmetro SHALLST foi aumentado em mais de três vezes em relação ao valor original, de forma a representar no início da simulação uma menor quantidade de água disponível na parcela mais rasa do aquífero, já que os dados de vazão observados nos primeiros anos da série apresentavam menor magnitude em relação aos anos finais.

- Parâmetros relacionados às Unidades de Resposta Hidrológica (*HRU input*)

Dos dezesseis parâmetros utilizados na calibração do módulo hidrológico, cinco destes relacionam-se às URHs geradas na bacia. O parâmetro CANMX sofreu acréscimo ao valor inicial do modelo (*default*), visando diminuir sutilmente o escoamento superficial e a infiltração da água no solo. O parâmetro EPCO foi reduzido em 35% em relação ao valor original, indicando que o modelo não permite uma retirada tão grande de água pelas plantas nas camadas mais profundas do solo. Também, o parâmetro ESCO foi reduzido em cerca de 95%, o que permite ao modelo representar uma maior compensação devido à extração de mais água das camadas superficiais do solo; a modificação deste parâmetro teve como intuito representar uma condição inicial de solo mais seco e suscetível a elevadas taxas de evaporação.

O parâmetro SLSOIL teve seu valor calibrado no intuito de que pequenos declives das laterais dos canais de drenagem já sejam suficientes para que haja contribuição do fluxo lateral. Por fim, aumentou-se o tempo necessário para o retorno do escoamento lateral através do parâmetro LAT\_TTIME, de forma a tentar equilibrar a magnitude da contribuição deste fluxo com o período que o mesmo deve ocorrer na bacia, visando um ajuste temporal da simulação.

- Parâmetro relacionado às sub-bacias (*Subbasin input*)

Apenas um dos parâmetros calibrados é vinculado às áreas de contribuição da bacia, e este relaciona-se com a rugosidade dos canais de drenagem tributários de cada uma das sub-bacias delimitadas pelo modelo. Visando ajustar o valor original de forma a representar mais

adequadamente as condições observadas na bacia – de canais naturais com pedras e rochas em seu leito e fundo – o valor calibrado do parâmetro CH\_N(1) foi elevado para 0,03.

- Parâmetro relacionado aos processos de canal (*Routing input*)

Utilizando a mesma justificativa para o ajuste aplicado às rugosidades dos canais tributários, o parâmetro CH\_N(2), que representa as rugosidades da rede de drenagem principal gerada pelo modelo, foi modificado para 0,03.

- Parâmetro relacionado às características físicas do solo (*Soil input*)

O parâmetro que expressa a quantidade de água disponível no solo, SOL\_AWC, varia de acordo com cada tipo de solo observado na bacia e com a quantidade de camadas de cada um destes. Visando aumentar a quantidade de água em todas as camadas, aplicou-se um multiplicador que elevou igualmente, para todos os grupos de solo, o valor inicial em 10%. O aumento deste parâmetro visou um acréscimo na geração de escoamento superficial, bem como o aumento da disponibilidade de água para evaporação do solo.

- Parâmetro relacionado aos atributos gerais da bacia (*Basin input*)

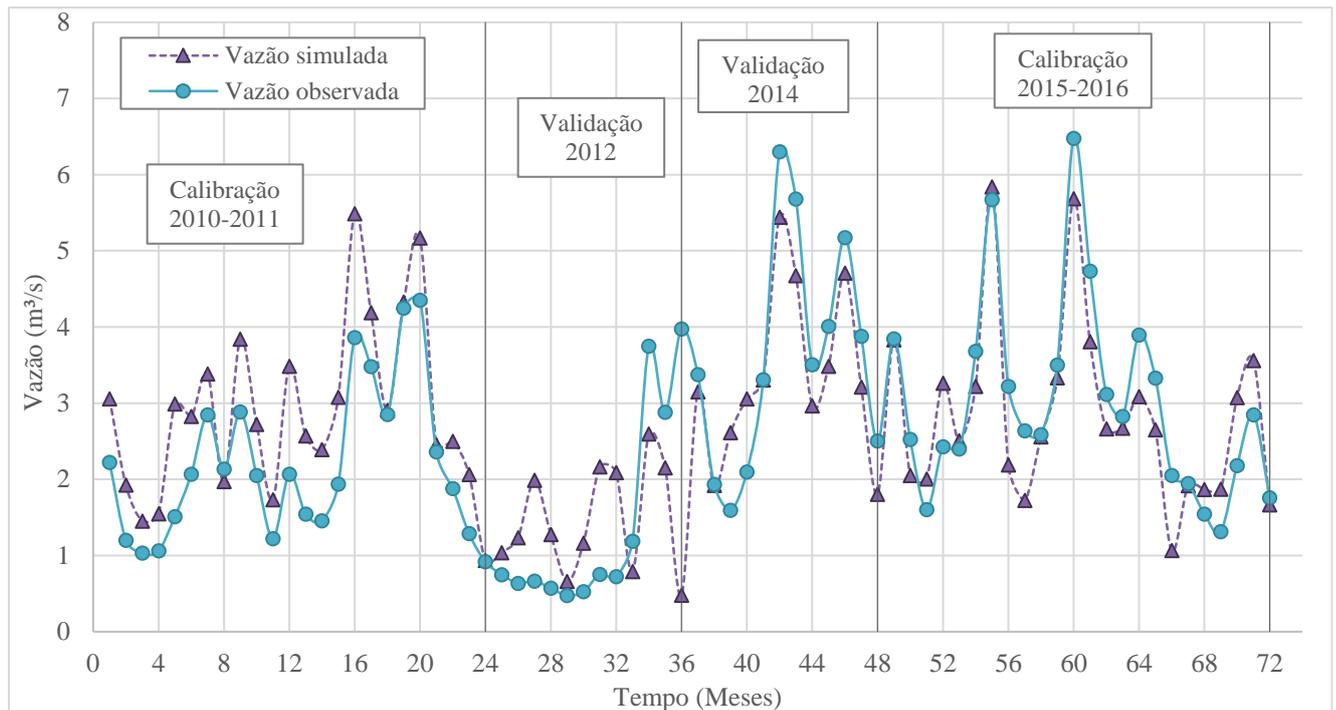
O parâmetro SURLAG é o responsável por controlar a porção do escoamento superficial que atinge a rede de drenagem em grandes bacias com tempo de concentração muito superiores a um dia. Como este não é o caso da área de estudo, o parâmetro torna-se não tão relevante, tendo o seu valor calibrado modificado para 1.

Conforme foi possível observar, o maior número de parâmetros sensíveis do modelo durante a calibração refere-se às águas subterrâneas da bacia. Isto poderia justificar-se devido a região ser predominantemente agrícola e pouco urbanizada, onde apenas pequenas porções de área são totalmente impermeabilizadas. Desta forma, a geração de escoamento superficial não é tão expressiva quanto em regiões mais urbanas, e a descarga líquida observada no exutório possui mais influência dos fluxos de base e lateral do que da contribuição direta da precipitação efetiva.

A Figura 18 ilustra o gráfico das vazões simuladas pelo modelo junto aos dados de vazão observados no exutório da bacia. Verificou-se que o modelo representa de forma adequada, na

maior parte do tempo, as ascensões e recessões do hidrograma, apresentando diferenças máximas de  $\pm 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  entre as vazões simuladas e as observadas, sendo as maiores imprecisões observadas no ano de 2012, onde o modelo gerou dois picos de vazão de magnitude superior aos dados medidos neste período.

Figura 18. Hidrograma simulado em relação ao hidrograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal.



(Fonte: própria da autora.)

Uma justificativa para esta mudança no comportamento da simulação é que o ano de 2012 apresentou um total pluviométrico de apenas 830,8 mm, cerca de 45% menos do que a média de precipitação normal na bacia. Desta forma, apesar do clima relativamente mais seco ocorrido neste ano, a simulação continuou a representar a magnitude dos dados de vazão de forma superior às observações realizadas, apesar de os valores de vazão simulados ainda assim serem inferiores aos demais anos reproduzidos na modelagem.

Porém, a simulação não conseguiu representar resultados adequados para o ano de 2013, tanto na etapa de calibração quanto na validação, mesmo este sendo um ano com precipitações que se aproximam mais da média na bacia. Desta forma, dos nove anos de dados disponíveis no local de estudo, este período de um ano foi desconsiderado das avaliações de desempenho utilizadas no presente trabalho.

Foi possível observar que o melhor ajuste das vazões simuladas em relação as observadas ocorreram nos anos de 2015 e 2016. Neste período, foi observada a ocorrência do fenômeno climático El Niño (CPTEC/INPE, 2019), cujo principal impacto na bacia é a elevação dos índices pluviométricos, ocasionando períodos mais úmidos. Os picos de vazão nestes anos se adequaram melhor aos valores observados, tanto na escala temporal quanto na magnitude.

Entretanto, o mesmo não ocorre para os anos de 2010 e 2011. Neste período comprovou-se a ocorrência do fenômeno La Niña (CPTEC/INPE, 2019), responsável por diminuir os totais pluviométricos da bacia do Taboão. Com isto, os dados simulados mostraram-se superestimados em relação aos dados observados na bacia, o que indica que o modelo não representa de forma tão adequada os picos de vazão ocorridos em períodos mais secos.

Apesar de o ano de 2012 e 2014 representarem períodos neutros na bacia, sem influência de fenômenos climáticos atuando no local (CPTEC/INPE, 2019), localmente observou-se um ano de 2012 extremamente seco com índices pluviométricos ainda inferiores que os observados em alguns anos de ocorrência de La Niña. O ano de 2014 apresentou precipitação mais próxima da média, mesmo com vazões medidas que se aproximavam dos valores de anos mais úmidos. Novamente, o modelo foi capaz de representar de forma mais fidedigna o hidrograma do período mais úmido, novamente superestimando as vazões dos períodos mais secos.

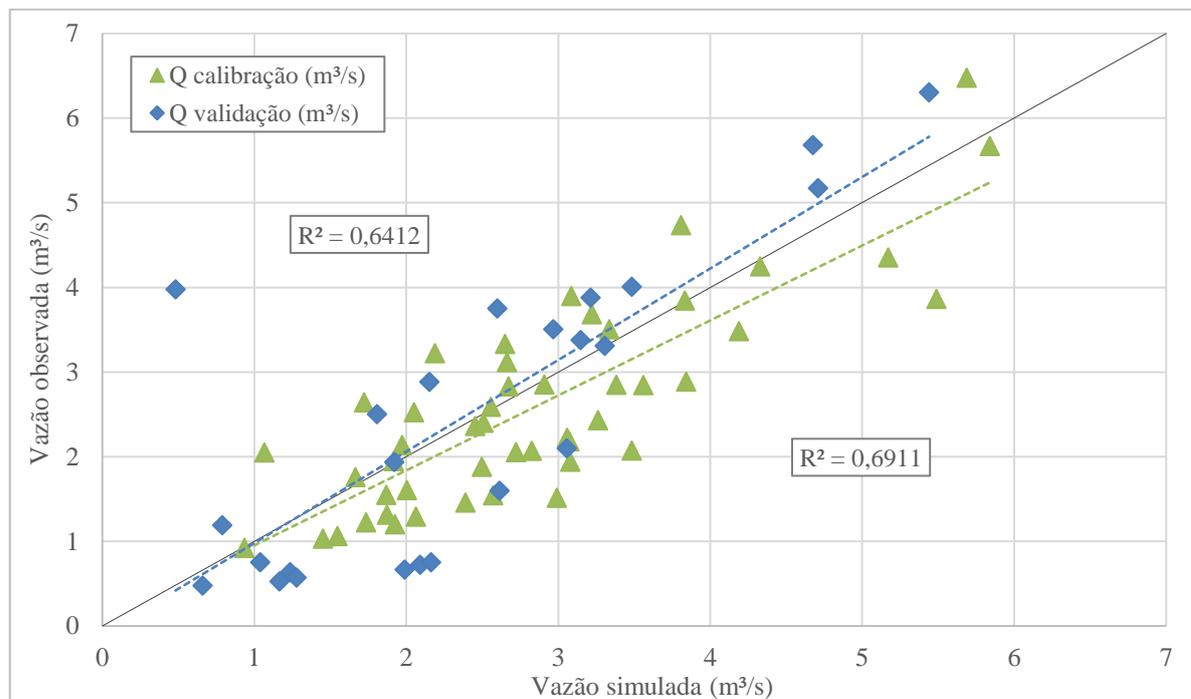
Desta forma, utilizando períodos com comportamentos hidrológicos relativamente distintos para a calibração (2010-2011, 2015-2016) e para a validação (2012 e 2014) verificou-se um desempenho apenas “Satisfatório” do módulo hidrológico, segundo as métricas estatísticas de desempenho consideradas neste estudo (MORIASI et al., 2007; VAN LIEW et al., 2007). Mesmo assim, priorizou-se a utilização de ambos os períodos, um mais seco e outro mais úmido, nas duas etapas de avaliação da simulação, de forma a buscar parâmetros que representem adequadamente o comportamento em qualquer época na bacia, mesmo que caracterizada por condições climáticas distintas.

A Figura 19 a seguir apresenta a correlação entre os dados de vazão simulados, no eixo das abscissas, e os dados medidos, no eixo das ordenadas. A partir dele, podemos observar que, para a etapa de calibração, os dados simulados tendem a ser maiores do que os dados observados, e que esta tendência a superestimativa aumenta conforme a magnitude das vazões

também se eleva. Já para a etapa de validação, o oposto ocorre e os dados observados são, em sua maioria, superiores aos dados simulados, principalmente para os maiores valores de vazão.

Em resumo, as tendências indicam que durante a calibração o modelo superestimou os valores de vazão, enquanto que na etapa de validação os resultados foram subestimados. Apesar de a linha de tendência da validação se ajustar melhor a reta de 45°, esta apresenta uma menor correlação entre os dados ( $R^2$  de 0,641) do que a calibração ( $R^2$  de 0,691). Apesar de a tendência da etapa de calibração estar a uma maior distância da reta de 45°, apresenta menor dispersão entre seus valores, e, portanto, maiores índices de correlação.

Figura 19. Correlação entre a vazão simulada e observada no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal e 2 anos de período de aquecimento.



(Fonte: própria da autora.)

## 5.2 SIMULAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA

A partir da calibração realizada para o módulo hidrológico apresentada anteriormente, utilizando-se então como parâmetros iniciais aqueles apresentados na Tabela 9, executou-se a primeira simulação, considerando desta vez nas avaliações de desempenho os resultados da modelagem de sedimentos. Os resultados obtidos, segundo as métricas de desempenho

aplicadas neste estudo, foram NSE de -0,25, porcentagem bias de 86,61% e RSR de 1,12. Como a simulação apresentou desempenho “Insatisfatório” em todas as métricas de avaliação consideradas (MORIASI et al., 2007; VAN LIEW et al., 2007), iniciou-se a etapa de calibração da concentração de sedimentos em suspensão.

A calibração do módulo de sedimentos também se deu de forma manual. Entretanto, não foi possível utilizar a função de auxílio *Manual Calibration Helper*, pois a mesma não permite ao usuário fazer modificações nos parâmetros referentes à produção de sedimentos, tanto no módulo de bacia (parte terrestre) quanto no canal (parte aquática). Desta forma, a modificação dos parâmetros se deu diretamente no *Databases* do modelo, através da substituição de valores.

Tomou-se como base de parâmetros calibráveis do modelo SWAT os apresentados por Sari (2017), em sua análise de sensibilidade para a calibração de dados sedimentológicos. Ressalta-se que, neste estudo, a calibração foi realizada de forma automática com o auxílio do algoritmo SUFI-2, presente no calibrador SWAT-CUP também utilizado no módulo hidrológico pela referida autora. Desta forma, dada a diferença nas técnicas de calibração utilizadas entre o trabalho de Sari (2017) e o presente estudo, a ordem de importância dos parâmetros que representam o comportamento do sedimento na bacia pode variar.

A partir da gama inicial de parâmetros calibráveis sugerida por Sari (2017), iniciou-se a modificação dos valores *default* presentes no SWAT, para os parâmetros sensíveis à produção de sedimentos, baseada na resposta do modelo quanto ao comportamento sedimentológico na bacia. Assim, além da avaliação das métricas de desempenho consideradas neste estudo (item 4.3.2), também analisou-se a plotagem do sedimentograma observado *versus* o sedimentograma simulado ao fim de cada simulação, de forma a verificar visualmente se os resultados representavam adequadamente a evolução temporal e a magnitude dos dados de concentração de sedimentos em suspensão medidos.

Os ajustes de parâmetros levaram em consideração as recomendações apresentadas no manual do usuário do SWAT, bem como permaneceram na faixa de valores limites propostos no modelo (WINCHELL et al., 2013; ARNOLD et al., 2012). Conforme indicado anteriormente na Tabela 8, o período utilizado para a calibração foram os anos de 2013 e 2015. Já para a validação, utilizou-se o ano de 2014.

A Tabela 11 a seguir apresenta os parâmetros ajustados para o módulo sedimentológico do SWAT. As métricas de desempenho obtidas para a calibração e validação do modelo são apresentadas na Tabela 12. O coeficiente NSE para a calibração foi de 0,45 e para a validação de 0,50. Já a porcentagem bias foi de 29,82% para a calibração e -11,43% para a validação, enquanto que RSR resultou em 0,74 na calibração e 0,71 na validação. Segundo o critério proposto por Moriasi et al. (2007) para o coeficiente de Nash-Sutcliffe, tanto na calibração quanto na validação o modelo possui desempenho considerado “Insatisfatório”. Entretanto, se considerados os limites propostos por Van Liew et al. (2007), o modelo possui desempenho “Satisfatório” tanto na calibração quanto na validação. Em relação a porcentagem bias, os resultados da simulação na calibração possuem desempenho considerado “Bom”, enquanto que na validação foram avaliados como “Muito bom”. O RSR para ambas as etapas foi considerado “Insatisfatório”.

Tabela 11. Parâmetros e seus respectivos valores calibrados para a simulação do módulo sedimentológico do modelo SWAT, considerando passo de tempo mensal.

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valor inicial	Faixa de variação	Valor calibrado
ADJ_PKR	Fator de ajuste da taxa de pico da propagação de sedimento na sub-bacia, para os canais tributários (-)	1	0,5 – 2,5	2,5
CH_BED_BD	Densidade aparente do sedimento no leito do canal (g.cc <sup>-1</sup> )	0	1,1 – 1,9	1,7
CH_BED_KD	Coefficiente de erodibilidade do leito do canal, causado por um jato de água submerso (cm <sup>3</sup> .(N.s) <sup>-1</sup> )	0	0,001 – 3,75	2,5
CH_BED_TC	Tensão crítica de cisalhamento para o leito do canal (N.m <sup>2</sup> )	0	0 – 400,0	150
CH_BNK_BD	Densidade aparente do sedimento nas margens do canal (g.cc <sup>-1</sup> )	0	1,1 – 1,9	1,5
CH_BNK_KD	Coefficiente de erodibilidade das margens do canal, causado por um jato de água submerso (cm <sup>3</sup> .(N.s) <sup>-1</sup> )	0	0,001 – 3,75	2,75
CH_BNK_TC	Tensão crítica de cisalhamento para as margens do canal (N.m <sup>2</sup> )	0	0 – 400,0	120
CH_COV1	Fator de erodibilidade do canal (-)	0	-0,05 – 0,6	0,5
CH_COV2	Fator de cobertura do canal (-)	0	-0,001 - 1	0,7
CH_ERODMO	Fator de erodibilidade do canal para os meses do ano (-)	0	0 – 1,0	0,8

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Valor inicial	Faixa de variação	Valor calibrado
LAT_SED	Concentração de sedimentos no fluxo lateral e de base (mg.L <sup>-1</sup> )	0	0 - 10000	8500
PRF	Fator de ajuste da taxa de pico para a propagação de sedimentos no canal principal (-)	1	0 – 2,0	0,0001
RSDIN	Cobertura residual inicial de sedimentos no solo (kg.ha <sup>-1</sup> )	0	0 - 25000	17000
SPCON	Parâmetro linear que regula a máxima quantidade de sedimento que pode ser aportada durante a propagação no canal (-)	0,0001	0,0001 – 0,01	0,0007
SPEXP	Parâmetro exponencial que regula a máxima quantidade de sedimento que pode ser aportada durante a propagação no canal (-)	1	1 – 2,0	1,5

(Fonte: própria da autora.)

Tabela 12. Métricas de desempenho obtidas para a calibração mensal do módulo sedimentológico do modelo SWAT.

Métricas de desempenho	Etapa		Valores mínimos para desempenho “Satisfatório”
	Calibração	Validação	
NSE	0,45	0,50	NSE > 0,5* NSE ≥ 0,36**
PBIAS	29,82%	-11,43%	PBIAS < ±55%
RSR	0,74	0,71	RSR ≤ 0,7

\*Segundo Moriasi et al. (2007); \*\* Segundo Van Liew et al. (2007).

(Fonte: própria da autora.)

A plotagem do sedimentograma auxiliou de forma direta no procedimento de calibração, sendo possível através dele identificar as parcelas da série onde a simulação não se assemelhava aos dados medidos, bem como em quais frações a mesma representava adequadamente os processos hidrossedimentológicos atuantes na bacia. Uma análise dos parâmetros utilizados na calibração do módulo de sedimentos e a justificativa para a modificação de seus respectivos valores em relação ao *default* do modelo é apresentada a seguir.

- Parâmetros relacionados aos processos de canal (*Routing input*)

Dos parâmetros utilizados para a calibração do módulo de sedimentos, 60% relacionam-se com os processos atuantes na rede de drenagem. Os valores utilizados para os parâmetros CH\_BED\_BD e CH\_BNK\_BD significam, respectivamente, que o leito é composto de material arenoso e as margens de um material siltoso. Já os parâmetros CH\_BED\_KD e CH\_BNK\_KD relacionam-se a erodibilidade do canal, sendo os leitos mais erodíveis representados pelo valor de  $3,75 \text{ cm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{s}^{-1})$ . Desta forma, os valores adotados para o leito e as margens representam um canal com média a alta erodibilidade.

De forma similar, os parâmetros CH\_BED\_TC e CH\_BNK\_TC representam a tensão de cisalhamento, cujo valor mais baixo é zero e representa leitos e/ou margens de baixa resistência à erosão. Os valores adotados para estes parâmetros, tanto para o leito quanto as margens, representam um canal com baixa a média tensão crítica de cisalhamento.

O parâmetro CH\_COV1, conceitualmente, é similar ao fator de erodibilidade dos solos (K) utilizado na USLE. Seu máximo valor é 1 e significa um canal sem nenhuma resistência a erosão. O valor obtido na calibração do parâmetro (0,5) indica que a rede de drenagem como um todo possui média erodibilidade. O parâmetro CN\_COV2 representa a degradação na rede de drenagem devido à presença ou falta de vegetação nas margens. Como se sabe, a vegetação afeta a degradação pois reduz a velocidade no canal e conseqüentemente o poder erosivo da água. Seu máximo valor é 1 e significa nenhuma cobertura por vegetação. O valor calibrado do parâmetro (0,7) indica que a rede de drenagem possui de baixa a média cobertura vegetal. O parâmetro CH\_ERODMO varia de acordo com os meses do ano, sendo o valor máximo de 1 indicativo de um canal com baixa resistência a erosão. O valor calibrado do parâmetro (0,8) indica um canal com média a alta erodibilidade.

- Parâmetros relacionados aos atributos gerais da bacia (*Basin input*)

São quatro os parâmetros relacionados aos processos em nível de bacia utilizados na calibração. O parâmetro ADJ\_PKR é utilizado na equação MUSLE e influencia a produção de sedimento nas Unidades de Resposta Hidrológica. O valor calibrado foi 2,5 vezes superior ao valor original, de forma a elevar-se a erosão nas URHs, que inicialmente era muito baixa. Já o parâmetro PRF, que controla o ajuste dos picos de concentração de sedimentos na rotina de propagação no canal, teve seu valor reduzido em relação ao original, pois o *default* gerava

altos picos de concentração de sedimentos, que ocasionavam uma grande diferença entre os resultados simulados e os observados.

Os parâmetros SPCON e SPEXP são responsáveis por regular a máxima quantidade de sedimento que pode ser transportada pela rede de drenagem, sendo o primeiro responsável pela regulação linear e o segundo pela regulação exponencial. O valor *default* do parâmetro SPCON retornava um sedimentograma de base com valores muito abaixo daqueles observados na bacia; desta forma, o valor calibrado foi sete vezes superior ao original, o que ocasionou um aumento linear para todos os resultados gerados pela simulação. Já o valor calibrado do parâmetro SPEXP foi 1,5 vezes superior ao valor original, na tentativa de elevar a magnitude dos picos de concentração de sedimentos, sem afetar os valores intermediários do sedimentograma.

Os dois parâmetros supracitados, SPCON e SPEXP, foram os mais sensíveis em toda a etapa de calibração do módulo sedimentológico. Ainda, o parâmetro SPCON mostrou-se o mais importante na modificação dos valores simulados, pois foi capaz de alterar a magnitude dos resultados e elevar os valores de todo o sedimentograma simultaneamente, mesmo para variações pequenas em relação ao seu valor inicial.

- Parâmetros relacionados às Unidades de Resposta Hidrológica (*HRU input*)

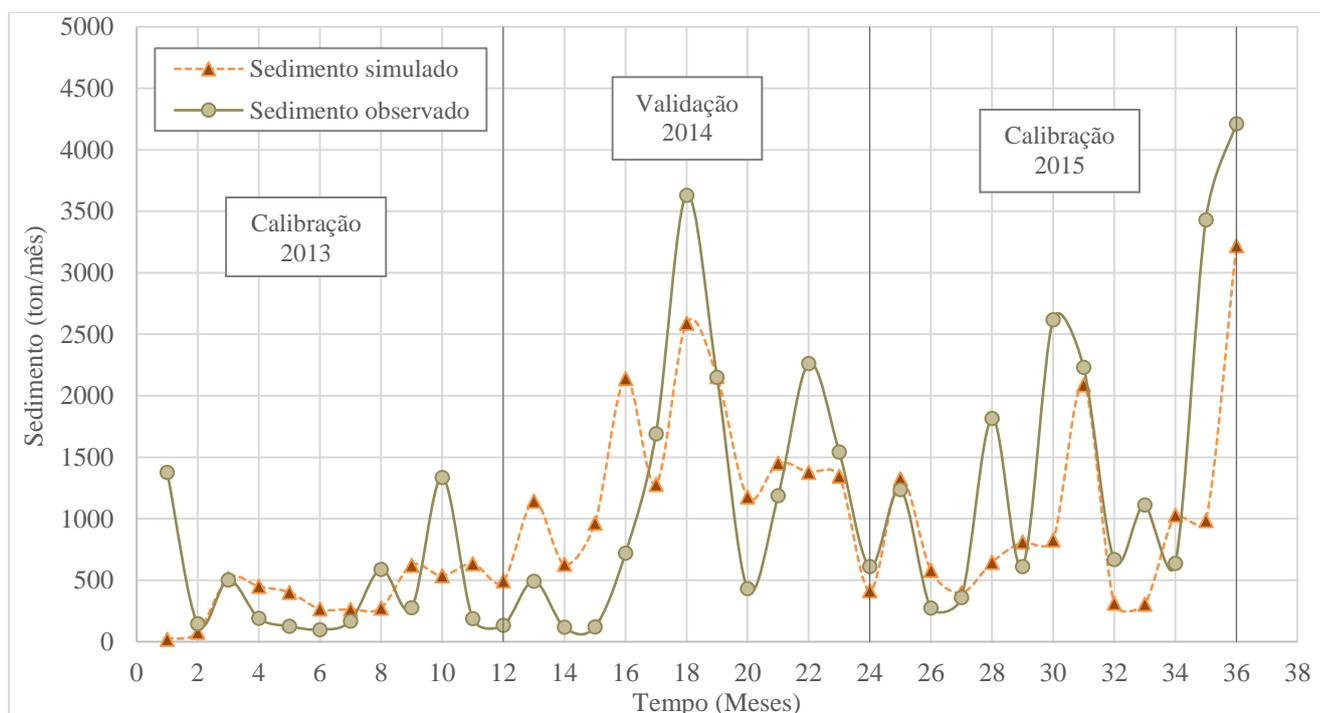
O parâmetro LAT\_SED mostrou-se pouco sensível a modificação da concentração total de sedimentos em suspensão. Usualmente, sua contribuição é baixa, a menos que o fluxo de base na bacia seja muito alto e, além disso, caracterizado por alta concentração de partículas sólidas. O parâmetro RSDIN, responsável pelo residual de partículas sólidas presente no solo, também se mostrou pouco sensível quando modificado unicamente. Apesar de a bacia do Taboão ser uma área com extensa produtividade agrícola, e conseqüentemente apresentar um acúmulo de partículas advindas da perda de solo no terreno, as modificações realizadas neste parâmetro não tiveram grande impacto na concentração de sedimentos observada no canal.

De forma geral, os parâmetros relacionados às Unidades de Resposta Hidrológica (*HRU input*) não se mostraram de grande importância na calibração do módulo sedimentológico. Os parâmetros gerais da simulação (*Basin input*) foram imprescindíveis na melhoria dos resultados, bem como os parâmetros de propagação no canal (*Routing input*), que auxiliaram

em um ajuste mais refinado e pontual. Isto pode indicar que, por mais que haja perda de solo devido aos processos erosivos nas vertentes da bacia, o que de fato controlaria a produção de sedimentos no exutório é a capacidade de transporte dos canais, e os processos hidrossedimentológicos nele atuantes – degradação e agradação. Desta forma, esta hipótese justifica a maior sensibilidade do modelo aos parâmetros de canal (*Routing*) em relação aos parâmetros de paisagem (*HRU*).

A Figura 20 ilustra o gráfico da concentração de sedimentos simulada pelo modelo junto aos dados de produção de sedimentos observados no exutório da bacia. Verificou-se que o modelo representa as ascensões e recessões do sedimentograma, na maior parte do tempo, apresentando diferenças máximas de  $\pm 2400 \text{ ton.mês}^{-1}$  entre a produção de sedimentos simulada e a observada. Em todos os anos da simulação, tanto no período de calibração quanto na validação, foram observados meses com maiores imprecisões dos dados simulados em relação aos observados, onde nestes períodos o modelo gerou picos ou vales que não foram representados pelos dados medidos.

Figura 20. Sedimentograma simulado em relação ao sedimentograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal.



(Fonte: própria da autora.)

O primeiro ano com dados disponíveis de concentração de sedimentos em suspensão foi 2013. O mês inicial da simulação apresentou valores de produção de sedimentos cerca de 60 vezes

menor do que o observado, sendo que nos meses seguintes os valores exibiram uma boa correlação com os dados medidos. No final deste mesmo ano, o sedimentograma não representou de forma adequada as ascensões e recessões observadas nos meses de agosto, setembro e outubro. Vale ressaltar que o ano de 2013 não foi considerado nas análises de desempenho do modelo hidrológico, nem na etapa de calibração nem na validação, por não representar de forma adequada o comportamento das vazões na bacia, acredita-se por ser o primeiro ano logo após um período muito seco.

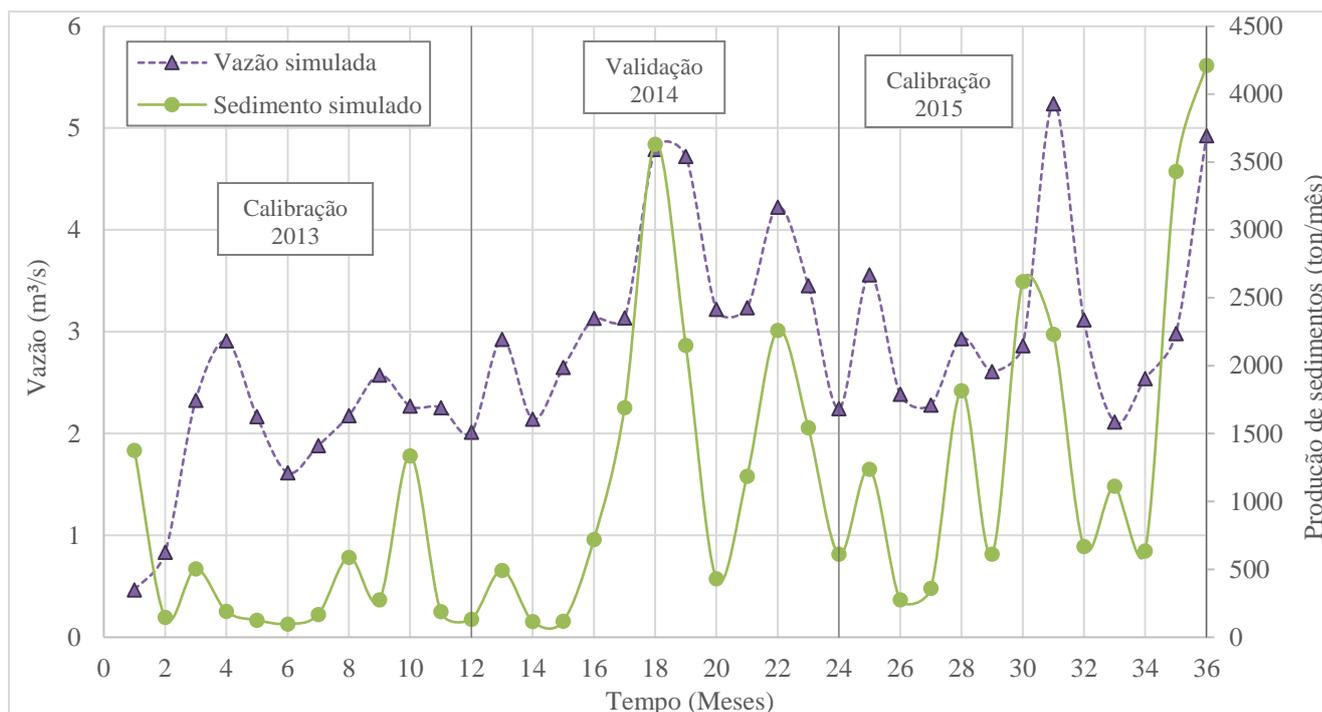
Os dados simulados para o ano de 2014 já apresentaram de forma mais adequada o comportamento dos sedimentos no exutório do arroio Taboão. As ascensões e recessões do hidrograma são bem representadas pela simulação em praticamente todos os meses do ano. O segundo maior pico de sedimentos de toda a série ocorreu neste ano, em junho de 2014. Os meses de maio e junho do mesmo ano tiveram os maiores índices pluviométricos observados na bacia: 245,6 mm e 223,8 mm, respectivamente. O modelo representou esta subida no sedimentograma, porém com um pico mais reduzido em relação ao dado observado.

O ano de 2015, o último com dados disponíveis na série, apresenta um comportamento sedimentológico semelhante ao ano de 2014. Nos primeiros meses, as ascensões e recessões do sedimentograma são bem representadas pelo modelo, com magnitudes dos valores simulados que se aproximam dos dados observados. A partir de maio de 2015, percebe-se um adiantamento dos vales e picos da simulação em relação aos dados medidos, ocasionando um deslocamento temporal do sedimentograma. Isto é percebido de forma mais proeminente em novembro de 2015, onde verifica-se a maior diferença de magnitude entre o simulado e o observado, quando o resultado do modelo subestimou a concentração de sedimentos em suspensão em cerca de 2400 ton.mês<sup>-1</sup>. No último mês de 2015 é observada a maior produção de sedimentos da série, sendo este mês bem representado pelos valores simulados.

Em relação ao sedimentograma dos três anos, constata-se que os menores valores medidos – e simulados – são observados no ano de 2013. O ano anterior, de 2012, foi atipicamente seco, com precipitações cerca de 45% inferiores à média da bacia. Isto pode justificar uma menor erosão nas vertentes devido aos baixos índices pluviométricos e, conseqüentemente, menor perda de solo e carreamento destas partículas até a rede de drenagem, impactando a diminuição da produção de sedimentos no exutório da bacia. Os anos de 2014 e 2015

apresentaram comportamento semelhante, sendo que em 2015 são observados cinco picos de concentração de sedimentos em suspensão e em 2014 apenas três. A Figura 21 a seguir apresenta o gráfico da relação entre a vazão simulada e a produção de sedimentos simulada na bacia, para os anos de 2013 a 2015.

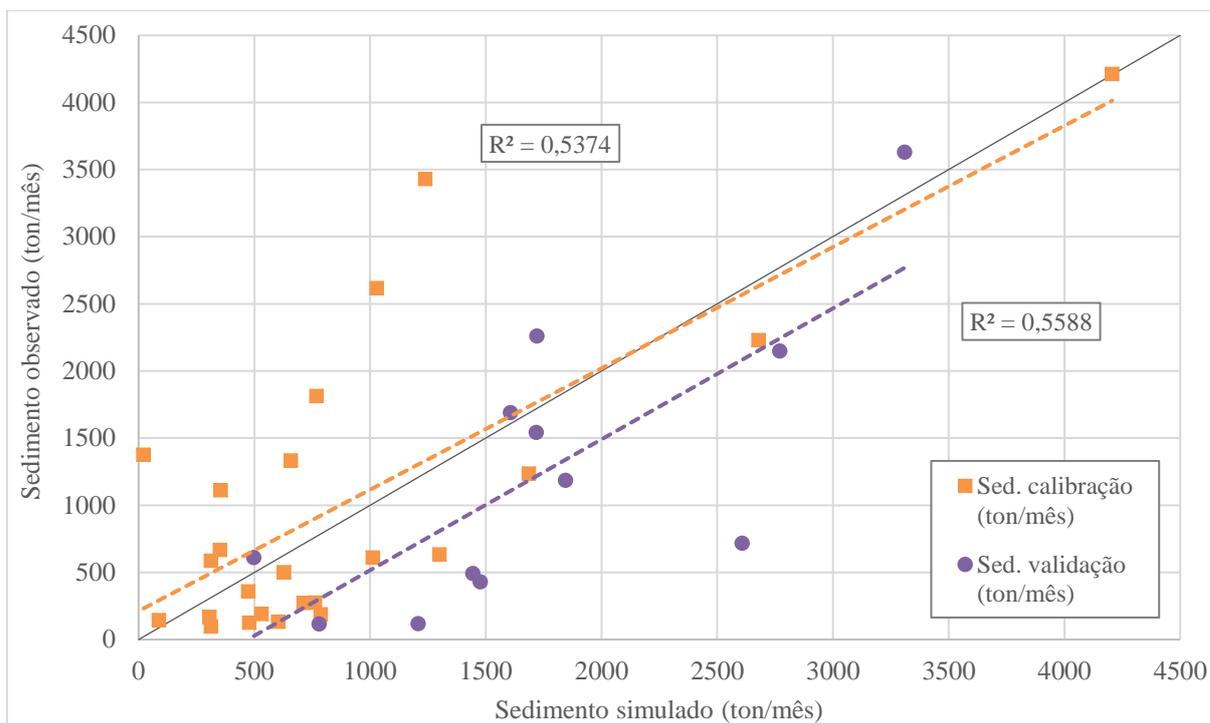
Figura 21. Hidrograma e sedimentograma simulados para o exutório da bacia do arroio Taboão, em simulação com passo de tempo mensal.



(Fonte: própria da autora.)

A Figura 22 a seguir apresenta a correlação entre os dados simulados, no eixo das abscissas, e os dados medidos, no eixo das ordenadas. A partir dele, podemos observar que, para a etapa de calibração, para magnitudes de até  $2250 \text{ ton.mês}^{-1}$ , os dados observados tendem a ser maiores do que os dados simulados. Entretanto, para os maiores valores de produção de sedimentos, a tendência muda e os dados simulados são superiores aos observados. Isto indica que durante a calibração, o modelo subestimou os menores dados de concentração de sedimentos, enquanto que os picos de produção de sedimentos foram superestimados pela simulação. Para a etapa de validação, a tendência é uma só e representa que os dados simulados são superiores aos dados observados, para todas as magnitudes de produção de sedimentos.

Figura 22. Correlação entre a produção de sedimentos simulada e observada no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal.



(Fonte: própria da autora.)

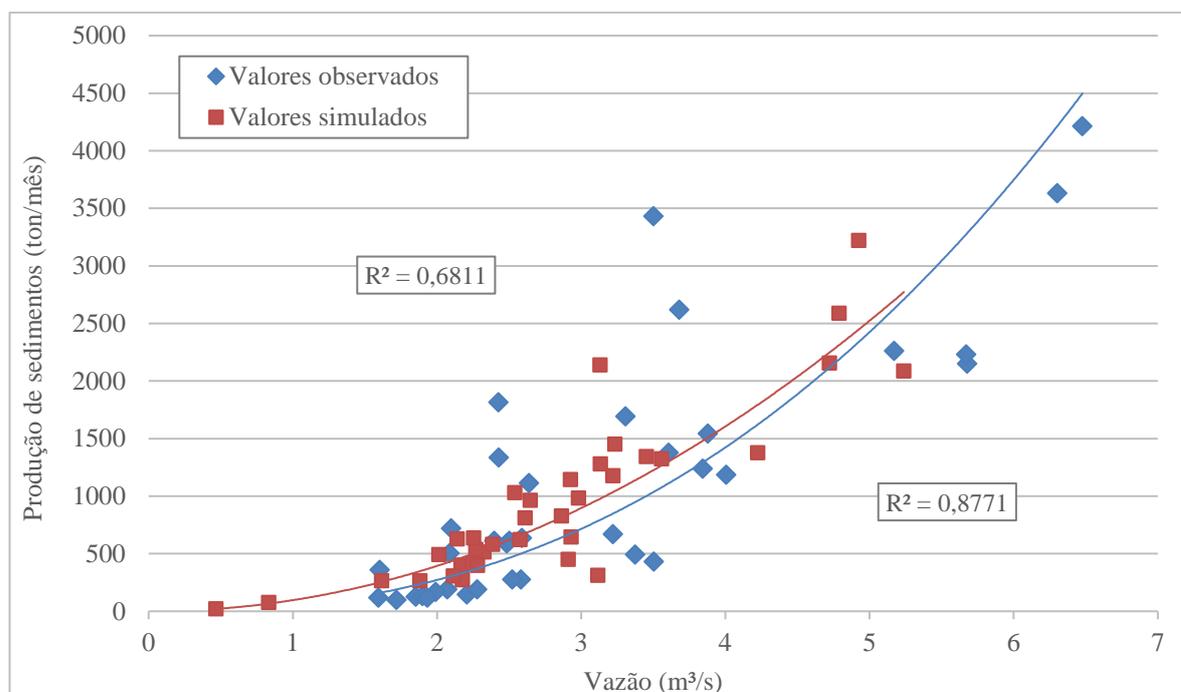
Apesar de a tendência da etapa de calibração estar mais próxima à reta de 45° do que a tendência dos dados da validação, a correlação dos dados da calibração ( $R^2$  de 0,537) é menor do que da validação ( $R^2$  de 0,559). Isto indica uma maior dispersão dos dados simulados para a etapa de calibração e menor para a verificação.

A Figura 23 apresenta a curva-chave da relação vazão-sedimentos dos dados observados na bacia, juntamente à relação gerada pelos dados de vazão e sedimentos simulados. A plotagem indica que os valores obtidos com a simulação estão inseridos na faixa de magnitudes dos dados observados. Para os menores valores de vazão, principalmente para a faixa de  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , os resultados gerados pela simulação encontram-se dentro da faixa de variação dos dados medidos no exutório da bacia.

Para valores mais elevados de vazão observados, a relação com a produção de sedimentos indica uma maior faixa de dispersão, o que também foi representado na relação obtida com os dados simulados. Isto mostra que, apesar dos critérios de desempenho aplicados ao módulo sedimentológico resultarem em valores apenas “Satisfatórios”, o modelo gerou resultados

condizentes com a ordem de magnitude da produção de sedimentos observada na bacia, apresentando correlações entre a vazão e a produção de sedimentos simulada que estão no interior da banda de dispersão dos dados observados.

Figura 23. Correlação da produção de sedimentos com a vazão para os dados observados na bacia e os valores simulados pelo modelo.



(Fonte: própria da autora.)

### 5.3 ANÁLISE DO PERÍODO DE AQUECIMENTO DO MODELO

A partir dos parâmetros calibrados para o modelo SWAT – tanto no módulo hidrológico quanto no módulo de sedimentos – foram realizadas simulações para dois diferentes cenários, variando o período de aquecimento utilizado no mesmo, conforme detalhado anteriormente na Tabela 8. Os anos excedentes da série, advindos da redução do tempo de aquecimento, foram englobados ao período de validação do modelo. Só foi possível realizar a análise da variação do período de aquecimento para os dados de vazão na bacia do arroio Taboão, pois não há dados de produção de sedimentos disponíveis para os anos de 2008 e 2009, que são o foco desta avaliação.

### 5.3.1. Cenário de simulação com 1 ano de período de aquecimento

A Tabela 13 a seguir apresenta os resultados obtidos, através da aplicação das métricas de desempenho consideradas neste estudo, para o cenário com 1 ano de aquecimento do modelo, e sua comparação com o cenário original simulado, utilizando 2 anos de aquecimento. A Figura 24 ilustra o comportamento do hidrograma no exutório da bacia, para o período total simulado neste cenário.

Tabela 13. Métricas de desempenho obtidas para a calibração e validação mensal do módulo hidrológico do modelo SWAT, utilizando 1 ano de período de aquecimento.

Métricas de desempenho	Calibração	Validação			Valores mínimos para desempenho “Satisfatório”
		2 anos aquecimento	1 ano aquecimento		
		2012 e 2014	2009, 2012 e 2014	2009	
NSE	0,63	0,63	0,70	0,75	NSE > 0,5* NSE ≥ 0,36**
PBIAS	-10,01%	3,77%	0,68%	-5,72%	PBIAS < ±25%
RSR	0,61	0,60	0,55	0,50	RSR ≤ 0,7

\*Segundo Moriasi et al. (2007); \*\* Segundo Van Liew et al. (2007).

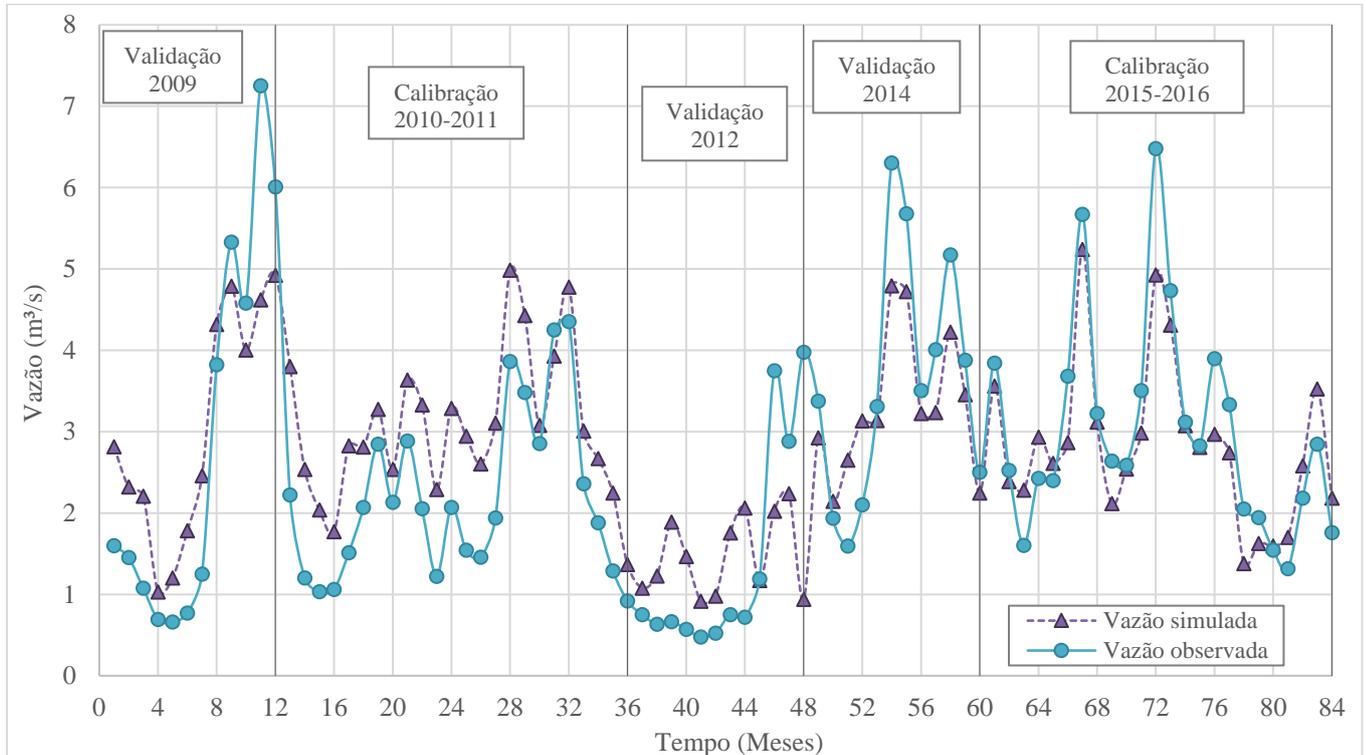
(Fonte: própria da autora.)

Através das métricas estatísticas aplicadas é possível perceber que, para o cenário com apenas 1 ano de aquecimento – metade do período sugerido pelo modelo – são obtidos resultados que apresentam um melhor desempenho do que o atingido com a primeira simulação, utilizando os 2 anos de aquecimento. O coeficiente NSE para a validação utilizando os anos de 2009, 2012 e 2014 foi de 0,70, o que representa um desempenho “Bom” segundo Moriasi et al. (2007) e “Satisfatório” segundo Van Liew et al. (2007). Mesmo considerando as variações de classificação propostas pelos autores supracitados, o acréscimo do ano de 2009 na simulação melhorou o desempenho do modelo na etapa validação, que no cenário original (com 2 anos de aquecimento) apresentava desempenho “Satisfatório” segundo o coeficiente de Nash-Sutcliffe, e agora apresenta desempenho “Bom”.

O coeficiente PBIAS passou de 3,77% no cenário com 2 anos de aquecimento, para 0,68% no cenário atual simulado. Isto indica uma melhora no desempenho, porém a classificação do coeficiente permanece como sendo “Muito bom”. O valor de RSR também apresentou

melhora, indo de 0,60 da simulação original para 0,55 no cenário atual, permanecendo também na classe de desempenho “Bom”.

Figura 24. Hidrograma simulado em relação ao hidrograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal e período de aquecimento de 1 ano.



(Fonte: própria da autora.)

Quando avaliado somente o ano de 2009, o NSE obtido foi de 0,75, permanecendo com desempenho “Bom” em relação a simulação original, de acordo com Moriasi et al. (2007), e elevando-se para um desempenho “Muito bom” segundo Van Liew et al. (2007). A porcentagem bias resultou em -5,72%, o que mantém o desempenho como “Muito bom”. Já o coeficiente de desvio padrão, que na simulação original com 2 anos de aquecimento apresentava desempenho “Bom” passou a ser classificado como “Muito bom”.

De um modo geral, percebeu-se ganho de desempenho na simulação ao reduzir em 1 ano o período de aquecimento do modelo SWAT e aplicá-lo na etapa de validação, elevando assim a confiabilidade da representação dos processos hidrológicos simulados na bacia. Uma hipótese para que isso tenha ocorrido é que este ano de 2009 apresentou comportamento mais úmido, período no qual a simulação representou de forma mais confiável os processos na bacia. De forma a aproveitar ao máximo a série de dados disponíveis, apesar da obtenção de melhores

métricas quando avaliado apenas o ano de 2009, o melhor desempenho obtido com a redução do período de aquecimento foi a inserção do ano excedente aos anos já utilizados para a validação (2012 e 2014).

### 5.3.2. Cenário de simulação sem aquecimento do modelo

A Tabela 14 a seguir apresenta os resultados obtidos, através da aplicação das métricas de desempenho consideradas neste estudo, para o cenário de simulação sem aquecimento do modelo SWAT, e sua comparação com o cenário original simulado, utilizando 2 anos de aquecimento. A Figura 25 ilustra o comportamento do hidrograma no exutório da bacia, para o período total simulado neste cenário.

Tabela 14. Métricas de desempenho obtidas para a calibração e validação mensal do módulo hidrológico do modelo SWAT, não utilizando período de aquecimento.

Métricas de desempenho	Calibração	Validação			Valores mínimos para desempenho "Satisfatório"
		2 anos aquecimento	1 ano aquecimento		
		2012 e 2014	2008, 2009, 2012 e 2014	2008	
NSE	0,63	0,63	0,67	-0,02	NSE > 0,5* NSE ≥ 0,36**
PBIAS	-10,01%	3,77%	-9,40%	-70,72%	PBIAS < ±25%
RSR	0,61	0,60	0,57	1,00	RSR ≤ 0,7

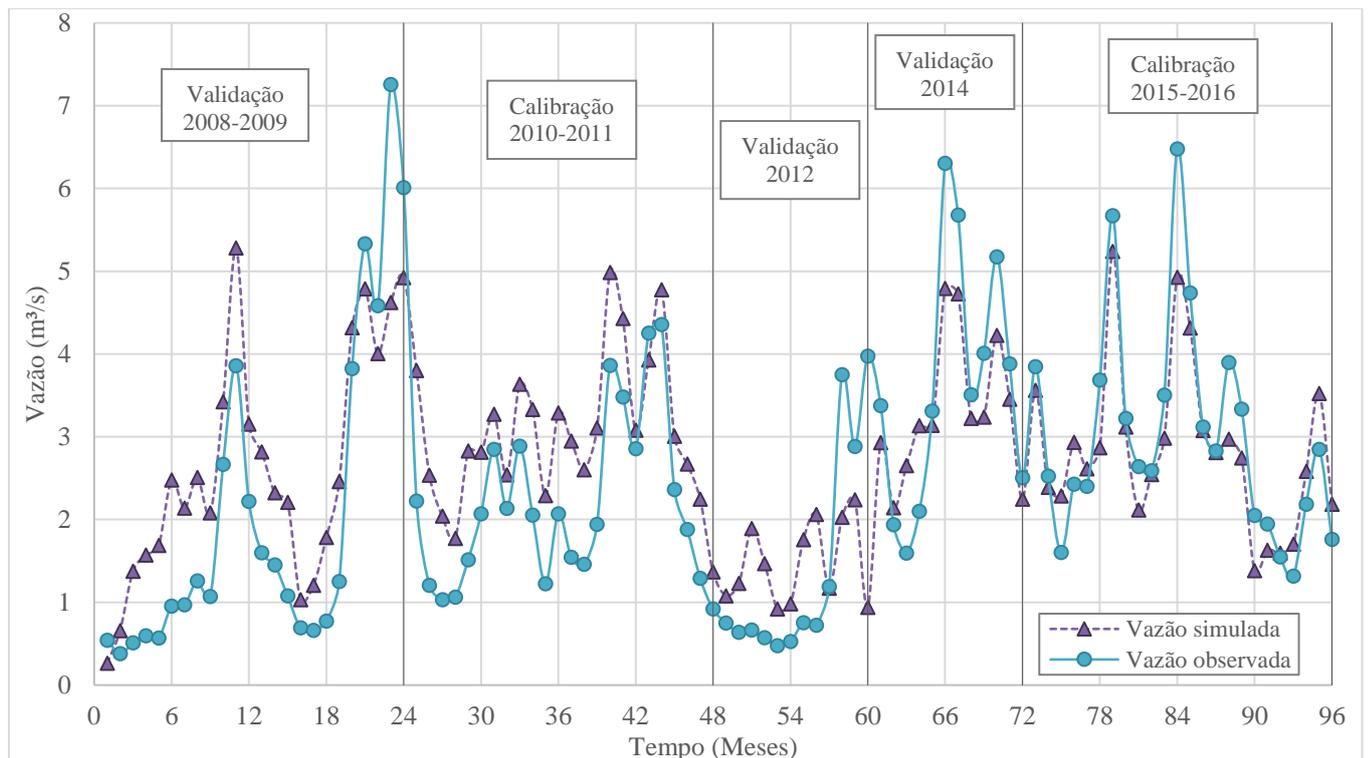
\*Segundo Moriasi et al. (2007); \*\* Segundo Van Liew et al. (2007).

(Fonte: própria da autora.)

Analisando a simulação através das métricas estatísticas consideradas para o cenário sem aquecimento do modelo são obtidos resultados que, ainda assim, apresentam um melhor desempenho do que o atingido com a simulação original, utilizando os 2 anos de aquecimento. O coeficiente Nash-Sutcliffe para a validação utilizando os anos de 2008, 2009, 2012 e 2014 foi de 0,67, o que representa um desempenho "Satisfatório" segundo Van Liew et al. (2007) e "Bom" segundo Moriasi et al. (2007). Mesmo considerando as variações de classificação consideradas por ambos os autores consultados, o acréscimo dos anos de 2008 e 2009 na simulação melhorou o desempenho do modelo na etapa validação, que no cenário original apresentava desempenho "Satisfatório" segundo o coeficiente NSE, e agora apresenta desempenho "Bom".

Já o coeficiente PBIAS passou de 3,77% no cenário com 2 anos de aquecimento, para -9,40% no cenário atual simulado. Apesar do aumento na porcentagem, a classificação do coeficiente permanece como sendo “Muito bom”. O valor de RSR também apresentou pequena melhora, indo de 0,60 da simulação original para 0,57 neste cenário, conservando-se na classe de desempenho “Bom”.

Figura 25. Hidrograma simulado em relação ao hidrograma observado no exutório da bacia do arroio Taboão, para simulação com passo de tempo mensal e sem aquecimento do modelo.



(Fonte: própria da autora.)

Quando avaliado somente o ano de 2008, ou seja, o primeiro período simulado pelo modelo, percebe-se uma mudança nas métricas de desempenho. O valor de NSE passa a ser negativo, atingindo -0,02, o que classifica a simulação como “Insatisfatória” (MORIASI et al., 2007; VAN LIEW et al., 2007). A porcentagem bias atinge valor de -70,72% e o coeficiente RSR chega a 1,00, o que representa um desempenho “Insatisfatório” segundo ambos os critérios.

À vista disso, percebe-se que a inclusão do ano de 2008 na simulação e a retirada total do período de aquecimento do modelo não produzem ganho de desempenho suficiente para os resultados simulados, ao contrário do observado no cenário anterior, com 1 ano de aquecimento. Percebe-se, ao retirar totalmente o período de equilíbrio dos parâmetros, que a

simulação até mesmo consegue representar as ascensões e recessões do hidrograma, porém sem aproximar-se da magnitude dos valores desejada, o que não ocasiona melhora no desempenho do modelo, mesmo não sendo suficiente para variar de forma expressiva as métricas de desempenho obtidas para os demais cenários (2 anos de aquecimento e 1 ano de aquecimento).

A Tabela 15 a seguir apresenta um resumo dos períodos de aquecimento testados e seus respectivos desempenhos, segundo as métricas de avaliação consideradas neste trabalho.

Tabela 15. Resumo das métricas de desempenho obtidas para todos os cenários de calibração e validação do modelo SWAT na bacia do arroio Taboão, em simulação com passo de tempo mensal.

Métrica de desempenho	2 anos de aquecimento		1 ano de aquecimento		Sem aquecimento	
	Calibração	Validação*	Validação só em 2009	Validação* + 2009	Validação só em 2008	Validação* + 2008-2009
NSE	0,63	0,63	0,75	0,70	-0,02	0,67
PBIAS	-10,01%	3,77%	-5,72%	0,68%	-70,72%	-9,40%
RSR	0,61	0,60	0,50	0,55	1,00	0,57

\*Considera o período original utilizado para a validação do modelo (anos de 2012 e 2014).

(Fonte: própria da autora.)

Observa-se que, para o caso em estudo na bacia hidrográfica do arroio Taboão, o período de aquecimento do modelo SWAT é considerado praticamente nulo, o que poderia ser justificado devido a área de drenagem da bacia ser razoavelmente pequena. Desta forma, a utilização de todo o período de aquecimento de 2 anos sugerido pelo modelo não é necessária para a estabilização das condições iniciais da simulação, o que foi observado através da melhora nas métricas de desempenho mesmo no cenário sem nenhum aquecimento.

Entretanto, ressalta-se que esta avaliação foi proposta para uma bacia com área de drenagem inferior a 100 km<sup>2</sup>, como é o caso do arroio Taboão. Se avaliado o período de aquecimento para o rio Ijuí, com aproximadamente 10.650 km<sup>2</sup> de área de contribuição, ou mesmo para o rio Uruguai, com 365.000 km<sup>2</sup>, os resultados provenientes da análise do período de aquecimento do modelo provavelmente iriam diferir do obtido neste estudo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) mostrou-se adequado para aplicação na bacia hidrográfica do arroio Taboão. A calibração do módulo hidrológico foi realizada a partir da utilização de quatro anos de dados, onde dois destes representaram um período mais seco na bacia e os demais um período mais úmido. Para o primeiro cenário de validação do modelo foram utilizados dois anos, onde ambos se caracterizavam por comportamentos climáticos levemente distintos.

Devido a utilização de períodos com dados de vazão observados de diferentes magnitudes, as métricas de desempenho obtidas mostraram-se “Satisfatórias”, tanto na calibração quanto na validação do modelo. Mesmo assim, optou-se pela utilização de períodos de diferentes características, tanto na calibração quanto na validação, visando a obtenção de uma gama única de parâmetros para a representação dos processos hidrológicos na bacia, não sendo aplicados ajustes distintos para períodos secos e úmidos. Verificou-se que na calibração os dados simulados são superestimados em relação aos medidos, ocorrendo o inverso na validação, quando a simulação subestimou os dados observados.

Finalizada a verificação do módulo hidrológico, a partir dos parâmetros já obtidos, iniciou-se a execução da calibração do módulo de sedimentos. Foram utilizados dois anos na etapa de calibração e um ano para a validação. O modelo de sedimentos também apresentou desempenho “Satisfatório” para a bacia hidrográfica do Taboão, apesar de exibir coeficientes de desempenho relativamente inferiores aos observados no modelo hidrológico.

Finalizada a calibração e a validação de ambos os módulos – hidrológico e de sedimentos – procedeu-se com a análise da influência do período de aquecimento do modelo SWAT. Foram simulados outros dois cenários distintos, um com apenas 1 ano de aquecimento e outro sem aquecimento, e comparados ao desempenho obtido no cenário-base (quando se utilizou 2 anos como *warm-up*).

Os resultados mostram que a redução do período de aquecimento de 2 anos para 1 ano elevou o desempenho do modelo na etapa de validação, aumentando a confiabilidade dos resultados simulados na bacia do Taboão. Desta forma, observa-se que a recomendação da utilização de 2 anos de aquecimento do modelo SWAT em simulações contínuas deve ser avaliada conforme a área de estudo, podendo ser reduzida para períodos menores que o sugerido pelo

manual do modelo sem comprometimento dos resultados gerados pela simulação, como foi o caso observado no presente trabalho.

Devido a curta extensão – apenas 3 anos – da série de dados disponíveis de concentração de sedimentos em suspensão do arroio Taboão, não foi possível aplicar a análise da variação do período de aquecimento aos dados de produção de sedimentos. Mesmo em bacias hidrográficas monitoradas há muitos anos, como é o caso do Taboão, verificam-se dificuldades na obtenção de dados de campo, principalmente envolvendo sedimentos.

Reitera-se a importância de investimento em monitoramento *in situ* nas bacias hidrográficas, para a obtenção de séries de dados contínuas e com alta resolução temporal, tornando-as assim mais confiáveis. Com isto, o uso de extensões maiores de dados para calibração e verificação de modelos proporciona uma maior confiabilidade aos resultados simulados e, conseqüentemente, melhor entendimento dos processos hidrossedimentológicos atuantes na bacia. Isto permite, dentre outras vantagens, uma utilização mais segura da modelagem hidrossedimentológica como uma ferramenta de prognóstico em bacias hidrográficas brasileiras.

Desta forma, destaca-se a importância da utilização das séries de dados disponíveis nas etapas essenciais da modelagem – a calibração e a validação dos resultados. Sugere-se então que o período de aquecimento do modelo seja sempre avaliado após a calibração, na tentativa de diminuir ao mínimo sua extensão, de forma a disponibilizar estes dados para utilização em demais etapas da simulação, como por exemplo a validação dos resultados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C.; ASHRAF VAGHEFI, S.; YANG, H.; SRINIVASAN, R. Global soil, land use, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT applications. In: *Nature Scientific Data*, v.6. n.1. p.1-11, 2019.

ANA (Agência Nacional de Águas). Ministério do Meio Ambiente (Brasília, DF). **Inventário de Estações**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/download>>. Acesso em: 19 de dezembro de 2019.

ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. **Soil and Water Assessment Tool** – Input/Output Documentation, Version 2012. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, Technical Report No. 439, 2012. 650p.

BORDAS, M. P; SEMMELMANN, F. R. Elementos de Engenharia de Sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**, 4 ed., Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 2009, p. 915-943.

BROWN, L.C.; BARNWELL, T.O. **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS**: documentation and user manual. Athens, Georgia: US Environmental Protection Agency (EPA). Office of Research and Development. Environmental Research Laboratory, 1987.

BUARQUE, D.C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias**: Estudo de caso do rio Madeira. 2015. 166p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

CARVALHO, A.P.; ABRÃO, P.U.R.; FASOLO, P.J.; POTTER, R.J. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do arroio Taboão (Pejuçara/Ijuí RS)**. Publicação interna, IPH/UFRGS, Porto Alegre, 1990. 41p. Mapa 1:25.000.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**. 2 ed. Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2008. 599p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2000. 154p.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. **Ocorrências dos fenômenos El Niño e La Niña e seus impactos no Brasil e na América do Sul**. CPTEC/INPE, 2019. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/#>>. Acesso em: 14 de novembro de 2019.

CHAPRA, S.C. **Surface water-quality modeling**. WCB/McGraw-Hill, Boston, Massachusetts. 1997. 844p.

CHEVALLIER, P. **Projeto Potiribu – Dados básicos de fluviometria e pluviometria.** Recursos hídricos nº 26. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 48p, 1993.

CLARK, E.H. The off-site costs of soil erosion. In: **Journal of Soil and Water Conservation.** v. 40. p. 19-22. 1985.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais.** 1 ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 350p.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Ministério de Minas e Energia (Brasília, DF). **Levantamento da Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: CPRM, 1ª edição, 2010. 254p.

CUNHA, P. Proposta de Planejamento da Rede Sedimentométrica. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (ENES)**, 10., 2012, Foz do Iguaçu, Paraná. 40p.

DEPINÉ, H. **Influência do preenchimento de falhas de dados horários de precipitação por redes neurais artificiais (RNAs) na simulação hidrológica de base física em uma bacia rural.** 2014. 123p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014

EMBRAPA (Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Brasília, DF). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 5ª edição, 2018. 355p.

EMMETT, W.W. **A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bedload sampler.** U.S. Geological Survey, Open-File Report 79-411. Denver, Colorado, 1979. 96p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos** (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FAGUNDES, H.O. **Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto.** 2018. 198p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

FAO. **Status of the World's Soil Resources.** Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. 2015. p.100-222.

FARIA, A. L. L.; SILVA, J. X.; GOES, M. H. B. Análise ambiental por geoprocessamento em áreas com susceptibilidade à erosão do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG). In: **Caminhos de Geografia**, v.4, n.9, p.50-65, 2003.

FILL, H.D.; SANTOS, I. Estimativa de concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade de Secchi. In: **Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa**, 5., 2001. 9p.

GLYSSON, G.D. **Sediment-transport curves**. U.S. Geological Survey, Open-File Report 87-218. Reston, Virginia. 1987. 47p.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. In: **Journal of Agricultural Sciences**, v.4, n.1, p-1-24. 1911.

HARGREAVES, G.L.; HARGREAVES, G.H.; RILEY, J.P. Agricultural benefits for Senegal River Basin. In: **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 111, n. 2, p. 113-124, 1985.

INMET. Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010. Edição Digital. Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, DF. 2018. 766 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em 23 de agosto de 2019.

JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. 1 ed. Cambridge. Cambridge University Press, 1998. 277p.

KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; GASSMAN, P.W.; DEBAEKE, P. A general, process-oriented model for two competing plant species. In: **Transactions of the ASAE**, v. 35, n. 3, p. 801-810, 1992.

LEONARD, R. A.; KNISEL, W. G.; STILL, D. A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. In: **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 5, p. 1403-1418, 1987.

LEPSCH, I.F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2 ed. São Paulo. Editora Oficina de Textos, 2010. 216p.

MCCARTHY, G.T. The unit hydrograph and flood routing. In: proceedings of **Conference of North Atlantic Division**, U.S. Army Corps of Engineers, 1938. p. 608-609.

MERRITT, W.S.; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. A review of erosion and sediment transport models. In: **Environmental modelling & software**, v. 18, n. 8-9, p. 761-799, 2003.

MERTEN, G.H.; HOROWITZ, A.J.; MINELLA, J.P.G.; CLARKE, R.T.; RIBEIRO, G.S. Estimativa do fluxo de sedimentos em suspensão utilizando a curva-chave aplicada a vazões mensais e diárias. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)**, 17., São Paulo, 2007. 13p.

MINELLA, J. P. G. **Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. 2003. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

MINELLA, J.P.G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul.** 2007. 162p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

MORIASI, D.N; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL R.D.; VEITH, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Trans. ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900. 2007.

MORRIS, G.L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook.** 1 ed., New York. McGraw-Hill Book Co., 1998. 848p.

MULLAN, D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. In: **Catena**, v. 109, p. 234-246, 2013.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Soil Conservation:** Assessing the National Resources Inventory, v. 1, 114p., Washington, D.C. The National Academies Press. 1986

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and Water Assessment Tool** - Theoretical Documentation, Version 2009. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, Technical Report No. 406, 2011. 618p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil.** 2.ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1989. 422p.

PANDEY, A.; HIMANSHU, S.K.; MISHRA, S.K.; SINGH, V.P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. In: **Catena**, v. 147, p. 595-620, 2016.

PENMAN, H.L.; MONTEITH, J.L. Evaporation and the environment in the state and movement of water in living organisms. In: **Proceedings of the Society for Experimental Biology**, Symposium. London, U.K., 1965, p.205-234.

PEREIRA, D.R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT.** 2013. 126p. Tese (*Doutor Scientiae*) – Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.

PETTS, G.E.; AMOROS, C. **Fluvial Hydrosystems.** 1 ed., London, UK. Chapman & Hall, 1996. 322p.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R.; BLAIR, R. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. In: **Science Magazine**. v. 267. p.1117-1123. 1995.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. In: **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.V.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada**. 1 ed. Curitiba. LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372p.

SARCINELLI, O.; MARQUES, J.F.; ROMEIRO, A.R. Custos e benefícios da adoção de práticas e medidas para conservação do solo agrícola: um estudo de caso na microbacia hidrográfica do córrego Oriçanguinha. In: **Informações Econômicas**, SP, v. 39, n.4, p.6-16. 2009.

SARI, V. **Monitoramento e modelagem da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica no noroeste do Rio Grande do Sul**. 2017. 312p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SCAPIN, J. **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria – RS**. 2005. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

SCS. **National Engineering Handbook**, Section 4 – Hydrology. Soil Conservation Service, Department of Agriculture, Washington, D.C. 1972. 762p.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. **EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator**. 1. Technical Bulletin n.1768. U.S. Department of Agriculture, Agricultura Research Service, 1990. 127p.

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4 ed., Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 2009, p. 35-51.

SOUZA, R.M.; SANTOS, I. KOBAYAMA, M. O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 18., 14p., Campo Grande, MS. 2009

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams**. Report n° 14. Minneapolis, Minnesota. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. 1963.

TELLES, T.S.; GUIMARÃES, M.F.; DECHEN, S.C.F. The costs of soil erosion. In: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 287-298, 2011.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2.ed., Porto Alegre. Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 2005. 680p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs** – Chapter 7: Sediment Properties. Engineer Manual n.1110-2-4000. Washington, D.C. 1995. p. 7-1:7-9.

UNEP. **Emerging issues in our global environment** – Year Book. Nairobi, Kenya. United Nations Environment Programme. 2012. 70p.

VAN LIEW, M. W. et al. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173–189, mar. 2007.

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering**. 1 ed., New York. American Society of Civil Engineers (ASCE). 1977. 745p.

VIERO, A.C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão/RS**. 2004, 119p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

WALLING, D.E. The sediment delivery problem. In: **Journal of Hydrology**, v. 65, n. 1-3, p. 209-237, 1983.

WALLING, D.E.; WEBB, B. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments. In: **Symposium on Sediment Budgets**, p. 337-350, Porto Alegre, Brasil, 1988.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C.A.; KINIRY, J.R.; SPANEL, D.A. The EPIC crop growth model. In: **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 497-0511, 1989.

WILLIAMS, J.R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. In: **Transactions of the ASAE**, v. 12, n. 1, p. 100-0103, 1969.

WILLIAMS, J.R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using Runoff energy factor. In: **Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, ARS-S-40**, p. 244-252, 1975.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. **ArcSWAT Interface for SWAT2012 – User’s Guide**. Blackland Research and Extension Center, Texas AgriLife Research, 720 East Blackland Road, Temple - Texas, 2013. 464p.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. In: **Agriculture Handbook**. n.282. Washington, D.C., 1965. 47p.