

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Néverton Scariot

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO SWAT NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ**

Santa Maria, RS
2023

Néverton Scariot

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO SWAT NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Hidrologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Civil**.

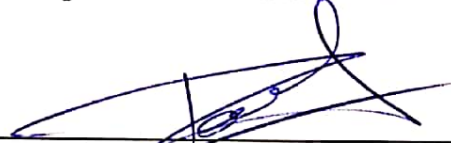
Orientador: Prof. Daniel Gustavo Allasia Piccilli

Santa Maria, RS
2023

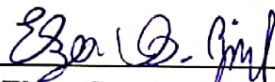
**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO SWAT NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil,
Área de Concentração em Hidrologia, da Uni-
versidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

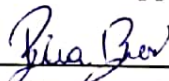
Aprovado em 8 de fevereiro de 2023:



Daniel Gustavo Allasia Piccilli, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Elzon Cassio Rippel, Me. (UFSM)



Bibiana Peruzzo Bulé, Me. (UFSM)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria e Acelino, pelo apoio incondicional todos esses anos. Sou muito grato pelo incentivo e carinho, pela compreensão e educação que recebi em todos os momentos; Aos meus irmãos, Douglas e Mateus, pelo apoio nos momentos de dificuldade, motivação e carinho; Aos meus avós Roberto e Dozolina, Ferdinando e Virginia (in memoriam) pelo exemplo de caráter, humildade e sabedoria;

Agradeço ao meu professor e orientador Daniel Allasia, exemplo de profissionalismo e dedicação a docência, por toda atenção e ensinamentos passados durante esse processo;

Por fim, e não menos importante, agradeço ao Elzon Cassio Rippel, que me apoiou no uso do modelo SWAT, e aos demais integrantes do grupo Ecotecnologias, por serem parceiros e contribuírem na minha formação.

Minha trajetória até aqui, só foi possível tendo vocês no caminho.

RESUMO

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ

AUTOR: Néverton Scariot

Orientador: Daniel Gustavo Allasia Piccilli

Na modelagem hidrológica, uma das principais dificuldades enfrentadas é a calibração eficiente dos parâmetros do modelo. O objetivo deste estudo, foi ajustar um modelo hidrológico com calibração semi-automática para a bacia hidrográfica do Rio Ibicuí (BHRI) utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT). A simulação foi realizada considerando os seguintes dados em seu processamento: hidro-climáticos (vazão, precipitação e temperatura), mapa de uso e cobertura da terra, tipos de solo e modelo digital de elevação, sendo que, os dados de precipitação e vazão foram obtidos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, no período de 2011 a 2020, o mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2018 obtido do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e o modelo digital de elevação obtido da missão *Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)* da NASA com resolução espacial de 90m/pixel. Para análise de sensibilidade de parâmetros, calibração e validação do modelo, utilizou-se o Software SWAT-CUP que, por meio do algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2), realiza testes de incerteza de cada parâmetro simulado. A série de vazões observadas da ANA foi dividida em períodos distintos para calibração e validação, e o modelo SWAT apresentou ajuste satisfatório para a estimativa da vazão na BHRI, com um coeficiente de NashSutcliffe (NSE)=0,87 e Pbias=-14,1% para a calibração e NSE=0,88 e Pbias=-22,2% para validação. Dessa forma, embora tenham sido detectadas algumas limitações nos dados de entrada disponíveis, os resultados obtidos evidenciaram um ótimo potencial de uso do modelo SWAT para a determinação das vazões na região de estudo, podendo servir de amparo a pesquisas futuras, bem como de suporte a decisão de gestores de recurso hídricos.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. SWAT. Balanço hídrico. Bacia do Rio Ibicuí.

ABSTRACT

TÍTULO DO TRABALHO EM INGLÊS:

AUTHOR: Néverton Scariot

ADVISOR: Daniel Gustavo Allasia Piccilli

One of the main challenges involved in hydrological modeling is the efficient calibration of model parameters. The objective of this study was to adjust a hydrological model with semi-automatic calibration for the Ibicuí watershed using the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model. The simulation was carried out considering the following input data in its processing: hydro-climatic variables (flow, precipitation), temperature, land use and land cover map (LULC), types of soil (TS) and the digital elevation model (DEM). The precipitation and flow data were obtained from the Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) and reference the period from 2011 to 2020, the temperature was obtained from Instituto Nacional de Meteorologia, the LULC map of 2018 was obtained from the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) and DEM was taken from NASA's Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) at a spatial resolution of 90m. For parameter sensitivity analysis, calibration and model validation, the SWAT-CUP Software was used, which through the Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2) algorithm, performs uncertainty tests for each simulated parameter. The series of observed flows from the ANA was divided into different periods for calibration and validation, and the SWAT model showed a satisfactory fit for estimating the flow at the BHRI, with a NashSutcliffe value (NSE)=0.87 and Pbias=- 14.1% for calibration and NSE=0.88 and Pbias=-22.2% for validation. Thus, although some limitations were found in the available input data, the obtained results showed a great potential for using the SWAT model to determine flows in the region of study, which could serve as support for future research, as well as backing for decision-making to water resource managers.

Keywords: Hydrological model. SWAT. Water balance. Ibicuí watershed

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Ciclo Hidrológico	13
FIGURA 2 – Fluxograma de funcionamento da modelagem	21
FIGURA 3 – Erosão e desmatamento na BHRI	23
FIGURA 4 – Mapa de localização da BHRI	24
FIGURA 5 – Mapa de Unidades de Relevo da BHRI	25
FIGURA 6 – Mapa de solos - BHRI	27
FIGURA 7 – Mapa de Uso e Cobertura da Terra - BHRI	28
FIGURA 8 – Gráfico de disponibilidade de dados pluviométricos	30
FIGURA 9 – Mapa de elevação com estações de precipitação utilizadas pelo modelo SWAT 30	
FIGURA 10 – Precipitação anual acumulada para o período de 2011 a 2020	31
FIGURA 11 – Temperatura máxima, mínima e média para a BHRI	31
FIGURA 12 – Mapa de localização das estações fluviométricas	32
FIGURA 13 – Análise de sensibilidade de parâmetros P-Value	34
FIGURA 14 – Hidrograma de vazão diária observada e simulada no período de calibração e validação	36
FIGURA 15 – Curva de permanência das vazões observadas e simuladas do período 2013 a 2020	37
FIGURA 16 – Precipitação média no período entre 2013 e 2020 espacializada por sub- bacia	38
FIGURA 17 – Saídas médias consideradas no cálculo do balanço hídrico (2013 a 2020) .	39
FIGURA 18 – Sensibilidade dos parâmetros 1	47
FIGURA 19 – Sensibilidade dos parâmetros 2	48
FIGURA 20 – Sensibilidade dos parâmetros 3	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Avaliação das precipitações para estimativa das condições de umidade antecedente do solo	17
TABELA 2 – Classificação hidrológica do solo	17
TABELA 3 – Classificação da declividade da BHRI.....	25
TABELA 4 – Classificação do Solo da BHRI.....	26
TABELA 5 – Classes de uso e ocupação do solo na BHRI	28
TABELA 6 – Estações pluviométricas utilizadas pelo SWAT.....	29
TABELA 7 – Descrição dos parâmetros calibrados, intervalos fisicamente observados, bem como análise final de sensibilidade	35
TABELA 8 – Desempenho do modelo classificados pelos índices NSE, PBIAS,Rš e RSR	36
TABELA 9 – Balanço hídrico anual no período de 2013 a 2020 com as saídas obtidas do SWAT output viewer.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<i>BHRI</i>	Bacia hidrográfica do Rio Ibicuí
<i>DEM</i>	Modelo de elevação digital do terreno
<i>ET</i>	Evapotranspiração efetiva
<i>HRU</i>	Unidade de resposta hidrológica
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>LATQ</i>	Vazão lateral
<i>LULC</i>	Uso e cobertura da Terra
<i>NSE</i>	Coefficiente de eficiência Nash Sutcliffe
<i>PERC</i>	Percolação da água abaixo da zona radicular
<i>PRECIP</i>	Precipitação média anual
<i>RHRU</i>	Região hidrográfica do Rio Uruguai
<i>SUFI2</i>	<i>Sequential Uncertainty Fitting</i>
<i>SURQ</i>	Vazão de escoamento superficial
<i>SRTM</i>	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
<i>TS</i>	Tipo de solo

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Número total de observações
t	Tempo em dias
i	i -ésimo dia
Q_i^{sim}	Vazão simulada
Q_i^{obs}	Vazão observada
Q_i^{mean}	Vazão média
SW_t	Água total resultante no solo (mm)
SW_0	Condição inicial de armazenamento de água no solo no dia
R_{day}	Precipitação acumulada no dia (mm)
Q_{surf}	Escoamento superficial no dia i (mm)
E_a	Evapotranspiração acumulada no dia i (mm)
Q_{qw}	Vazão de retorno no dia i (mm)
W_{seep}	Vazão de percolação e desvio no dia i (mm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO.....	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	CICLO HIDROLÓGICO E MODELAGEM DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	13
2.2	O MODELO SWAT	15
2.3	ESTUDOS BRASILEIROS APLICANDO O MODELO SWAT	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	23
3.2	RELEVO	24
3.3	PEDOLOGIA	26
3.4	USO E COBERTURA DA TERRA	27
3.5	DADOS HIDRO-CLIMÁTICOS	29
3.6	AJUSTE DO MODELO SWAT.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO BALANÇO HÍDRICO	37
5	CONCLUSÃO	40
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS USA- DOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO	47

1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 80, com o aumento populacional, preocupações ambientais e a expansão da economia mundial, houve um acréscimo na demanda de recursos hídricos, principalmente para geração de energia, produção de alimentos e abastecimento de água (PIMENTEL et al., 2004; TANTAWY et al., 2018). Diante desse cenário, a modelagem hidrológica de alta resolução com base física é indispensável para avaliar de forma precisa a disponibilidade de recursos hídricos (WADA et al., 2016).

Um dos modelos hidrológicos amplamente utilizados no âmbito internacional é o *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*, o qual destaca-se como um modelo semi-distribuído, de base física, com capacidade de simular o balanço hídrico continuamente (ARNOLD et al., 1998). No entanto, por requerer grande quantidade de dados espaciais e temporais, e dispor de mais de mais de 600 parâmetros, os processos de modelagem, calibração e validação podem ser demorados e onerosos (TOKAR; MARKUS, 2000; MAKWANA; TIWARI, 2014). Ainda que o SWAT seja amplamente utilizado internacionalmente, no Brasil seu uso concentra-se na modelagem de pequenas bacias, existindo uma lacuna de trabalhos ajustando o modelo a bacias grandes e médias (BRESSIANI et al., 2015), como é o caso da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (BHRI).

Dessa forma, será realizado um estudo de caso de avaliação do SWAT em bacias médias a grandes, neste trabalho, especificamente na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (BHRI), considerada o coração do bioma Pampa em território brasileiro (SEMA, 2021). Atualmente a região sofre com altos índices de desmatamento, sendo pequenas e restritas as porções que mantêm a vegetação natural. Essas alterações são consequência das pressões e expansões agrícolas, com destaque às lavouras de arroz irrigado na região da Campanha (fronteira entre Brasil e Uruguai), além da soja e do trigo. Ademais, a produção agrícola com práticas inadequadas de manejo, por exemplo, revolvimento do solo, resultam em uma alta produção de sedimentos, provocando problemas de natureza física, como o assoreamento, e químicas, haja visto que as partículas de sedimentos finos (coloides e argilas) trazem adsorvidos na sua estrutura poluentes como, por exemplo, fertilizantes e pesticidas para o rio (DIDONÉ; MINELLA; MERTEN, 2015).

Logo, essa é uma pesquisa que procurará avaliar a aplicabilidade de um modelo de alta resolução com base física numa bacia desafiadora com problemas reais, com um modelo que, embora seja um dos padrões mundiais para esse tipo de modelagem, não foi suficientemente testado nesse tipo de bacias no Brasil.

1.1 OBJETIVO

Avaliar a aplicabilidade e desempenho do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí localizada no bioma Pampa.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

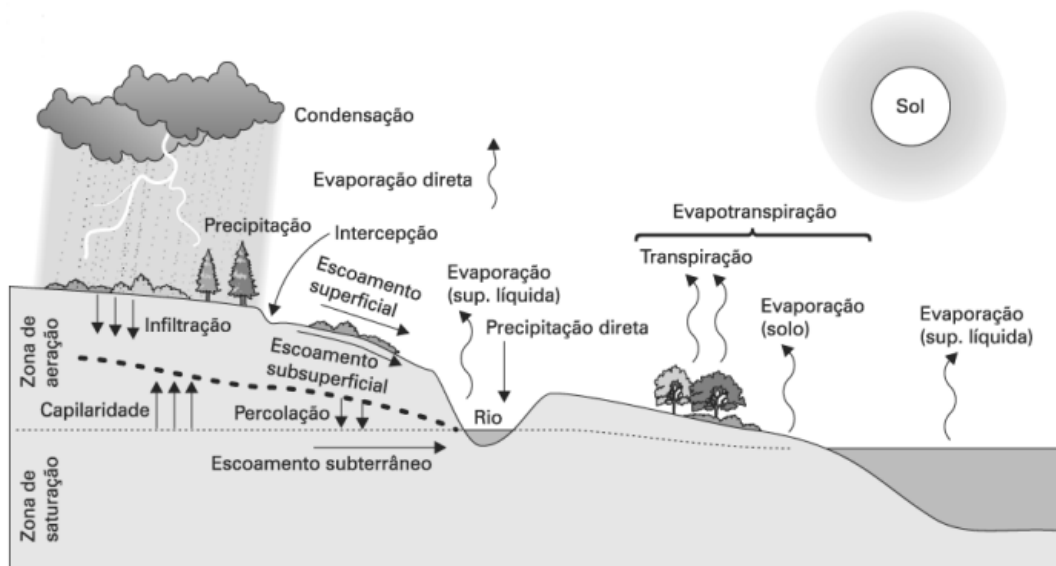
- Construir um banco de dados combinando informações de diferentes fontes, para utilizar como entrada no modelo SWAT, contemplando dados: hidro-climáticos observados; modelo digital de elevação (MDT); tipos de solos (TS) e uso e cobertura da terra (LULC);
- Utilizar o software SWAT-CUP para análise semi-automática de sensibilidade de parâmetros;
- Calibrar e validar o modelo SWAT utilizando o software SWAT-CUP, para obter dados para calcular o balanço hídrico na bacia do Rio Ibicuí;
- Mapear a geração de escoamento superficial, evapotranspiração efetiva e escoamento subterrâneo da bacia, considerando uma condição estática de uso e cobertura da terra do ano de 2018.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO E MODELAGEM DOS RECURSOS HÍDRICOS

O ciclo hidrológico representa um processo dinâmico de transporte, transferência entre estados físicos, ou movimentação da água nos oceanos, no subsolo, na superfície continental e na atmosfera (FERRREIRA, 2019). A transferência da água ocorre em 2 direções, superfície-atmosfera, passando do estado líquido para gasoso, resultado dos fenômenos evaporação e transpiração e, também, ocorre no sentido inverso, atmosfera-superfície, num fenômeno denominado precipitação (SILVEIRA, 2001). O esquema do ciclo hidrológico é representado na Figura 1.

Figura 1 – Ciclo Hidrológico



Fonte: (BRAGA et al., 2005)

Na Figura 1 observa-se que as fases que compõe o ciclo hidrológico são as seguintes:

- Precipitação: transferência da água da atmosfera para a superfície terrestre;
- Escoamento: movimento da água superficial, subsuperficial e subterrânea;
- Infiltração: parte da água que penetra no solo;
- Percolação: movimento da água nos vazios do solo;
- Evaporação: parcela da água que retorna à atmosfera em forma de vapor;
- Transpiração: processo de perda de vapor de água pelas plantas e seres vivos;
- Intercepção: água retida nas folhas e depressões do terreno.

Para Marinho et al. (2013) a modelagem hidrológica é uma ferramenta científica desenvolvida com o intuito de compreender e representar o funcionamento das bacias hidrográficas e simular diferentes cenários. Rennó e Soares (2000) dizem que um modelo pode ser considerado uma simplificação da realidade e tem objetivo de contribuir e sustentar a compreensão dos processos que envolvem essa realidade, normalmente por meio de equações matemáticas e procedimentos composto por variáveis e parâmetros.

No Brasil o desenvolvimento de estudos e caracterização de impactos hidrológicos é limitado, pois a rede de monitoramento hidrometeorológica é insuficiente e dispersa (ALLASIA et al., 2004; COLLISCHONN et al., 2007), frequentemente não atendendo o requisito mínimo estabelecido às unidades fisiográficas pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) (RODDA, 2011). Diante deste cenário, é indispensável a utilização de modelos hidrológicos para melhor representar os fenômenos hídricos, visto que, estes modelos conseguem representar os processos do ciclo hidrológico nas regiões onde não existem estações de monitoramento (COLLISCHONN et al., 2007).

Neste contexto, os modelos hidrológicos são ferramentas que permitem a realização de análises mais eficientes do sistema hídrico, a fim de serem utilizados em projetos de obras hidráulicas, bem como, de amparo à pesquisas e tomadas de decisões em problemas de gerenciamento de recursos hídricos (COLLISCHONN et al., 2007; MORAES et al., 2003; MARINHO et al., 2013; ZANETTI et al., 2009).

Existem diversos tipos de modelos hidrológicos, que podem ser classificados de acordo com: o tipo de variáveis utilizadas (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relação entre essas variáveis (conceituais ou empíricos), a dependência temporal (discretos ou contínuos) e a discretização espacial (distribuídos, semi-distribuídos ou concentrados) (MOREIRA, 2005; ALMEIDA; SERRA, 2017).

Os modelos estocásticos consideram a distribuição de probabilidade em pelo menos uma das variáveis envolvidas. O nível futuro de um reservatório é, por exemplo, uma variável aleatória e depende da vazão afluente futura. O modelo é determinístico quando não considera a probabilidade das variáveis, ou seja, cada valor de entrada produz um único valor de saída. É válido destacar que uma variável de entrada pode ser aleatória, mas se o modelo produz um único valor de saída, o modelo ainda assim é considerado determinístico (MARINHO et al., 2013; FAYAL, 2008).

Os modelos conceituais segundo Santos (2009) podem ser subclassificados em semi-conceituais e físicos. O primeiro descreve os processos hidrológicos utilizando simplificações físicas. O segundo considera variações espaciais e temporais da bacia, bem como, utiliza as principais equações diferenciais do sistema físico, com intuito de simular com maior precisão os processos hidrológicos reais observados. Para fins de suporte à decisões de gestores de recursos hídricos, Chordia et al. (2022) consideram os modelos físicos como a melhor opção.

De outro modo, os modelos empíricos são aqueles que não apresentam nenhuma relação dos processos físicos para explicar os fenômenos naturais, geralmente utilizando análises esta-

tísticas, como métodos de correlação e análises de regressão. Também são conhecidos como *black-box models* uma vez que, são limitadas as informações dos processos internos do modelo (CHORDIA et al., 2022).

Os modelos discretos referem-se a eventos únicos, considerando apenas informações pontuais. Diferenciam-se dos modelos contínuos, uma vez que estes consideram informações de longo período.

Os modelos distribuídos consideram a distribuição temporal e espacial das variáveis na bacia hidrográfica, nesses modelos a bacia é dividida em uma grade de células e cada célula é considerada uma unidade hidrológica separada. Os modelos distribuídos aplicam a lei da conservação de massa em cada célula da bacia (SANTOS, 2009; LOPES, 2017).

Os modelos concentrados, diferem dos distribuídos por não considerar a distribuição espacial, sendo que, os valores de chuva, evaporação, infiltração, entre outras variáveis, são considerados em termos médios na bacia, e essa média representa o total (SANTOS, 2009).

Os modelos semi-distribuídos espacialmente dividem a bacia em sub-bacias, e essas são consideradas homogêneas (concentradas), porém, na totalidade, o modelo opera de forma distribuída. Um modelo semi-distribuído pode captar as variações espaciais sem demandar um processamento computacional robusto (BIFTU; GAN, 2001)

A escolha de um modelo hidrológico é condicionada ao objetivo da modelagem, à disponibilidade de dados, ao nível de discretização da bacia modelada e, ainda, ao conhecimento do usuário sobre a operação e o funcionamento do modelo. Essas condições permitirão que o usuário defina o modelo mais adequado em termos de eficiência e precisão dos resultados (RIPPEL et al., 2020).

A partir dos anos 90, houve uma popularização dos Sistemas de Informações Geográficas SIGs, bem como, um aumento na capacidade computacional de processamento de informação. Esses avanços tecnológicos permitiram a evolução da hidrologia numérica computacional, possibilitando o desenvolvimento e uso de modelos hidrológicos mais complexos, ou seja, com mais entradas de informações (BOLFE et al., 2011). Vale observar que, com o fácil acesso a informações de produtos de sensoriamento remoto e com os atuais avanços tecnológicos na classificação de uso e ocupação de solos, é possível utilizar dessas variações para obter melhores resultados de simulações.

2.2 O MODELO SWAT

Com o desafio de desenvolver um modelo computacionalmente eficiente, que permitisse detalhamentos espaciais, que utilizasse dados de entrada acessíveis, que simulasse cenários de manejo da terra no tempo contínuo e que os resultados fossem aceitáveis, no início dos anos 90 o *Agricultural Research Service (USDA-ARS)* em parceria com o *AgriLife Blackland Research Center* da *Texas A&M University* desenvolveram o *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)* (ARNOLD et al., 1998).

O SWAT é um modelo conceitual de base física, semi-distribuído e de simulação contí-

nua, amplamente utilizado para o gerenciamento de bacias hidrográficas e simulações de impactos das práticas de manejo da terra na produção de escoamento, evapotranspiração, sedimentos e produtos químicos agrícolas (NEITSCH et al., 2011; MEDEIROS; SILVA, 2014). Além disso, pode ser utilizado para prever os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos e desenvolver estratégias de adaptação e mitigação a esses impactos (KANKAM-YEBOAH et al., 2013).

A utilização do modelo SWAT é facilitada, uma vez que, trata-se de um modelo de código aberto, de fácil instalação e existem interfaces gráficas que permitem ao usuário integrá-lo à SIGs, como o ArcGIS (ArcSWAT) (WINCHELL et al., 2007) e o QGIS (QSWAT) (DILE et al., 2016), tornando os processos de modelagem mais intuitivos e práticos.

O modelo SWAT oferece como alternativas para estimar o escoamento superficial, o método de infiltração de *Green & Ampt* e o procedimento *Curve Number (NRCS)* antigo SCS (GREEN; AMPT, 1911; USDA-SCS, 1972; NEITSCH et al., 2011). O escoamento superficial ocorre sempre que a taxa de aplicação de água na superfície excede a taxa de infiltração do solo, e pode ser calculado tanto pela Equação 2.1 como pela Equação 2.4.

A equação do *Curve Number* é um modelo empírico baseado em estudos realizados em pequenas bacias rurais dos Estados Unidos, envolvendo relações chuva-vazão em diferentes tipos de solo e cobertura da terra. O método do SCS CN é um dos mais utilizados para o cálculo do escoamento superficial e pode ser calculado pela Equação 2.1.

$$Q = \begin{cases} 0 & \text{para } P \leq I_a \\ \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} & \text{para } P > I_a \end{cases} \quad (2.1)$$

O valor de S representa a capacidade máxima de retenção de água no solo, e pode ser calculado pela Equação 2.2 e as abstrações iniciais I_a (Equação 2.3) estão associadas à infiltração, retenção de água pela cobertura vegetal e em depressões do terreno. É comum considerar essas perdas iniciais como 20% da capacidade de infiltração, embora existam estudos que comprovaram que em alguns casos o valor de 20% seja superestimado. Ponce e Hawkins (1996) realizaram estudos considerando dados de diversas bacias norte americanas e concluiu que as abstrações iniciais tiveram variações de 9,5% a 38%, de acordo com o tipo do solo, uso e cobertura da terra e declividades do terreno.

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2.2)$$

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (2.3)$$

Onde: Q representa o escoamento superficial; P é a precipitação; S é o potencial máximo de retenção de umidade do solo, após o início do escoamento; I_a são as abstrações iniciais, incluindo infiltração e intercepções; e o CN é um parâmetro adimensional tabelado em função do tipo de solo, do uso e cobertura da terra e condições de umidade antecedente.

Tabela 1 – Avaliação das precipitações para estimativa das condições de umidade antecedente do solo

Precipitação acumulada nos últimos 5 dias (mm)		
AMC	Estação seca (abril a setembro)	Estação úmida (outubro a março)
I	<13	<36
II	13 a 28	36 a 53
III	>28	>53

Fonte: (MELLO; SILVA, 2013)

O SCS definiu 3 tipos de umidade antecedente do solo, conforme apresentados na Tabela 1, sendo que:

- AMC I é a condição de umidade do solo em seu ponto de murcha, ou seja, é uma condição em que o solo está seco
- AMC II são solos com umidade antecedente média, próxima à capacidade de campo
- AMC III é uma condição do solo está com umidade acima da capacidade de campo

O método *Curve Number* reuniu os solos dos Estados Unidos em quatro grandes grupos (A, B, C e D), e as características estão apresentadas na Tabela 2. Posteriormente Sartori, Neto e Genovez (2005) propuseram uma extensão da classificação hidrológica do solo realizada por Neto et al. (1989) para solos brasileiros.

Tabela 2 – Classificação hidrológica do solo

Grupo	Característica	Taxa mín Infiltração
A	solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados.	>7,62 mm/h
B	solos contendo moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa	3,81-7,62 mm/h
C	solos com baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração	1,27-3,81 mm/h
D	solos com alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, principalmente solos argilosos com alto potencial de expansão.	<1,27 mm/h

Fonte: (SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005)

A equação de *Green e Ampt*, utilizada para estimar a infiltração da água no solo é baseada na lei de Darcy e os parâmetros necessários para seu uso, são relativamente fáceis de encontrar. A equação parte da premissa que a água infiltra no solo praticamente seco, como uma frente úmida, e pode ser calculada conforme Equação 2.4.

$$f_{inf,t} = K_e \cdot \left(1 + \psi_f \frac{\theta_s - \theta_i}{F_{inf}} \right) \quad (2.4)$$

Onde: $f_{inf,t}$ é a taxa de infiltração da água no solo no tempo (mm/h) t , K_e é a condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h), ψ é o potencial matricial médio na frente de umedecimento (mm), θ_s é a umidade do solo na saturação θ_i é a umidade inicial do solo e I é a infiltração acumulada no instante t (mm).

A estimativa de infiltração utilizando o método *Curve Number* pode ser considerada mais completa para bacias rurais, entretanto, alguns estudos propõe relações empíricas entre o parâmetro CN e a condutividade hidráulica (K_e) do método de Green & Ampt, fornecendo um meio de estimar a K_e em função do CN (Equação 2.5). Essa relação incorpora os impactos da cobertura do solo ao método de Green & Ampt (NEARING et al., 1996).

$$K_e = \frac{56,82 \cdot K_{sat}^{0,286}}{1 + 0,051 \cdot \exp(0.062 \cdot CN)} - 2 \quad (2.5)$$

No que refere-se a estimativa de evapotranspiração potencial (PET), três métodos distintos podem ser escolhidos para simulação do modelo. O método Penman-Monteith, o método Priestley-Taylor, e o método Hargreaves. Cada um requer entradas diferentes de dados, sendo que: o método Hargreaves (Equação 2.6) é o mais simples, pois necessita somente a temperatura do ar; o método Priestley-Taylor (Equação 2.7) além da temperatura do ar, requer radiação solar e umidade relativa; por fim, o método de Penman-Monteith (Equação 2.8) é o mais completo e requer radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (NEITSCH et al., 2011).

$$ET_o = 0,0023 R_{omm/dia} (t_{max} - t_{min})^{0,5} (t_{med} + 17,8) \quad (2.6)$$

$$ET_o = 1,26W(R_n - G) \quad (2.7)$$

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34\mu_2)} \quad (2.8)$$

Onde: Δ é a declividade da curva de pressão de vapor no ponto de temperatura média ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é a radiação solar líquida total do gramado ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); e_s é a pressão de saturação do vapor médio diário (kPa); e_a é a pressão atual de vapor médio diário (kPa); μ_2 é a velocidade do vento média diária a 2m de altura (m s^{-1}); T_a é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$).

O procedimento de modelagem exige que o modelador importe um modelo digital de elevação do terreno (DEM), que será utilizado para delimitação da bacia hidrográfica, definição dos fluxos divisão dessa em sub-bacias, bem como, definição de classes de declividades e cursos d'água. Em seguida, são inseridos os mapas de uso e cobertura da terra (LULC) e tipo de solo (TS) ao programa. Mediante a sobreposição das informações de LULC, TS e DEM, o SWAT agrega as características físicas semelhantes, em cada sub-bacia, gerando delimitações homogêneas, denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (do inglês, HRU's) (ARNOLD

et al., 2012; NEITSCH et al., 2011; CHORDIA et al., 2022; BHATTA et al., 2019). Para fins de simulação padrão, os dados que compõem as HRU's são considerados estáticos durante a modelagem, mantendo valores constantes na análise.

Além dessas entradas, o modelo requer dados climáticos de: precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, dependendo da metodologia escolhida para o cálculo da PET (DURÃES, 2010). Os dados climáticos apresentam variações temporais e descrevem a relação de entradas e saídas de água do sistema, baseadas na equação do balanço hídrico, representada na Equação 2.9.

A estrutura de funcionamento do SWAT é fundamentada na propagação de escoamentos na bacia hidrográfica e a simulação é dividida em duas etapas: fase do terreno e fase de propagação (ARNOLD et al., 2012). Na fase do terreno, existem sub-rotinas que calculam: a evapotranspiração, a percolação, o escoamento superficial, sub-superficial e o subterrâneo. Essas variáveis permitem que o balanço hídrico seja calculado em cada HRU. Os resultados somados representam as vazões de saída de cada sub-bacia. Já na fase de propagação, as resultantes das vazões de cada sub-bacia são direcionados através da rede hídrica em direção ao seu exutório da bacia hidrográfica (NEITSCH et al., 2011).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.9)$$

Para verificação de eficiência de modelos em bacias hidrográficas existem procedimentos básicos que devem ser seguidos, trata-se da análise de sensibilidade de parâmetros, calibração e validação do modelo, onde os parâmetros são ajustados a partir da comparação com os dados observados (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016).

O processo de calibração visa ajustar os parâmetros do modelo comparando a simulação a valores fisicamente observados na bacia objeto de estudo, em outras palavras, é o ajuste de parâmetros coerentes com a realidade observada. Entretanto, alguns parâmetros apresentam uma sensibilidade maior ao ajuste, e uma pequena variação provoca uma grande alteração nos resultados (ROSSI et al., 2008). Desse modo, no processo de calibração é importante definir, *a priori*, quais parâmetros são os mais sensíveis, e, *a posteriori*, calibrar faixas de valores adequadas para cada parâmetro (ABBASPOUR; JOHNSON; GENUCHTEN, 2004).

Uma vez identificados os parâmetros mais sensíveis e calibrado o modelo, é realizada uma nova simulação utilizando uma série de dados de um período diferente da calibração. Os parâmetros já calibrados são utilizados nessa simulação que é denominada validação do modelo (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016).

Para realizar os processos de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT, (ABBASPOUR et al., 2007) desenvolveram o *SWAT calibration and uncertainty programs (SWAT-CUP)* um programa que opera com a saída de dados da simulação SWAT e integra diferentes algoritmos de calibração de parâmetros, tanto manuais, como semi-automáticos e automáticos. Entretanto, Arnold et al. (2012) salientam que ao calibrar um modelo de base

física, os parâmetros de entrada devem se manter dentro de uma faixa de incerteza real, ou seja, nenhum procedimento de calibração automática pode extrapolar os valores físicos observados na bacia hidrográfica.

No Brasil o modelos SWAT tem sido utilizado em trabalhos com diferentes objetivos, Bressiani et al. (2015) identificaram em um estudo de revisão mais de 100 publicações utilizando o SWAT, entre 1999 e 2013. A maioria em análises de vazão, embora tenha sido usado em simulações de transporte de sedimentos, poluentes e poucos na simulação de cenários hipotéticos. Bressiani et al. (2015) no mesmo estudo, concluíram que a grande maioria os estudos são de natureza acadêmica, existindo uma lacuna quanto ao uso do SWAT por órgãos governamentais e comitês de bacias hidrográficas. Além disso, alguns trabalhos podem estar mascarando algumas características, por mais que a aplicação apresente um bom ajuste estatístico.

Para avaliação do desempenho e precisão das simulações de modelos chuva-vazão, Moriasi et al. (2007) recomenda que se utilize os indicadores estatísticos de *Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)*, apresentado na equação 2.10 e *Percent Bias (PBIAS)*, equação 2.11.

O coeficiente de eficiência NSE é o indicador estatístico de uso mais comum entre os usuários do modelo SWAT (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016), ele determina a magnitude relativa da variância residual (ruído) dos dados simulados em comparação com a variância de dados observados (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Para Moriasi et al. (2007) um ajuste ideal entre os dados simulados e observados deve apresentar valores de NSE igual a 1 e quando o resultado do NSE for menor do que 0, indica um desempenho inaceitável do modelo, onde a média dos dados observados é considerada melhor que a simulação feita.

$$NSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{mean})^2} \right] \quad (2.10)$$

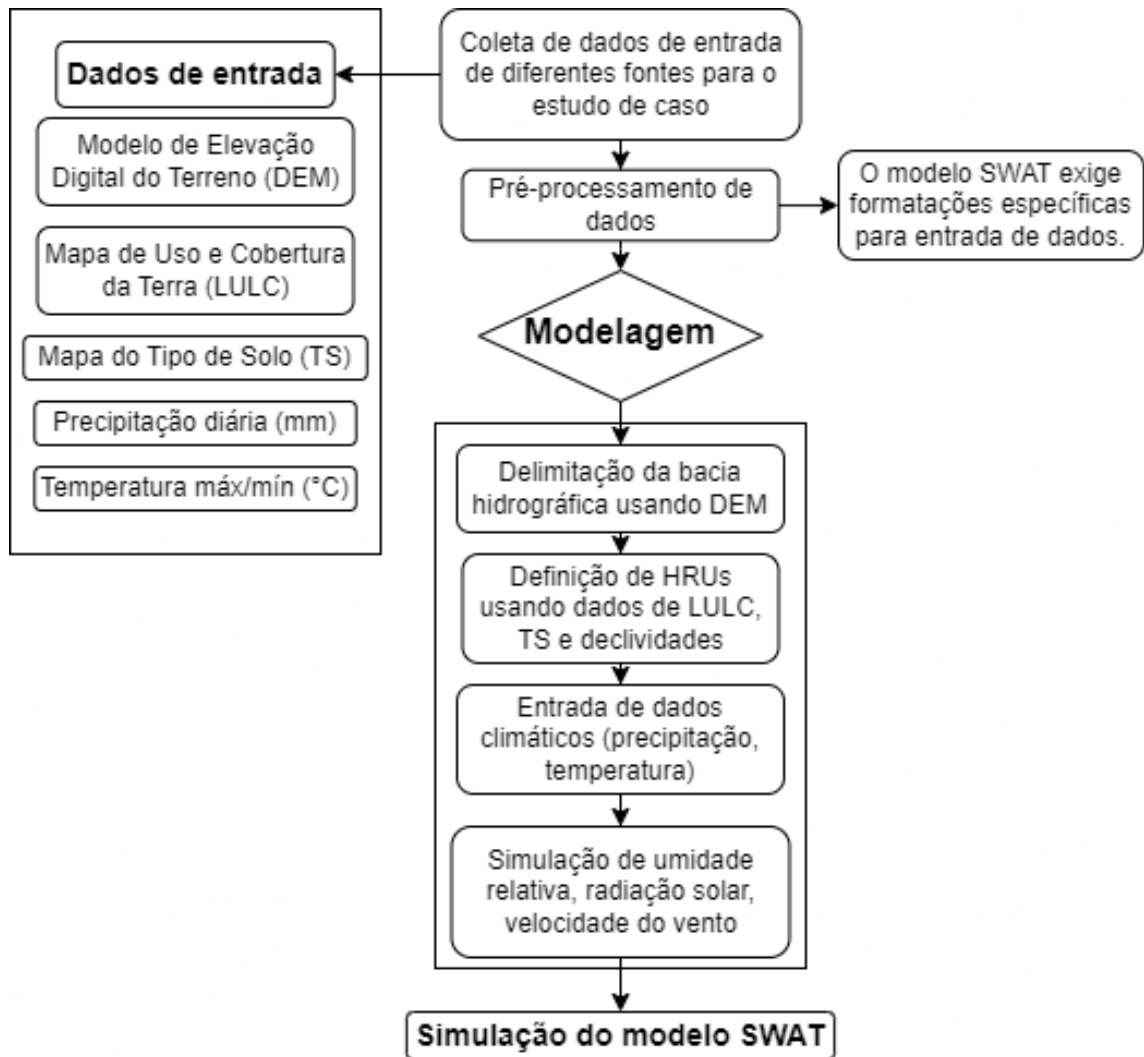
O PBIAS sugerido por Gupta, Sorooshian e Yapo (1999) avalia quanto a tendência da média das vazões simuladas é maior ou menor que as vazões observadas. O resultado ideal do PBIAS é de 0, valores positivos indicam uma subestimação do modelo, enquanto valores negativos representam uma superestimação do modelo (MORIASI et al., 2007).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right] \cdot 100 \quad (2.11)$$

No geral, para (MORIASI et al., 2007), simulações que resultam em valores de NSE maiores que 0,50, e PBIAS $\pm 25\%$ são considerados satisfatórios para modelos de simulação de vazão.

A configuração do modelos SWAT, é apresentada no fluxograma da Figura 2

Figura 2 – Fluxograma de funcionamento da modelagem



Fonte: Scariot (2023) adaptado de (CHORDIA et al., 2022)

2.3 ESTUDOS BRASILEIROS APLICANDO O MODELO SWAT

O território brasileiro abrange uma área de grande proporção, com diferentes variabilidades climáticas e existência de distintos biomas, sendo, portanto, objeto de diferentes estudos no âmbito da modelagem. A seguir, serão apresentados alguns dos estudos realizados aplicando o modelo SWAT no Brasil, onde a maior quantidade de trabalhos encontrados são de modelagem de vazão, embora o modelo já tenha sido utilizado para modelagem de transporte de sedimentos e de cenários hipotéticos de mudança de uso e cobertura da terra (BRESSIANI et al., 2015).

Fauconnier (2017) realizou estudos utilizando o modelo SWAT na bacia do Rio Ibicuí no período de 2003 a 2013, com o objetivo de verificar se o modelo SWAT poderia ser aplicado. Os resultados encontrados por Fauconnier (2017) correspondem a um $NSE=0,59$ para o período de 2003 a 2013, $NSE=0,54$ (2003 a 2009) e $NSE=0,67$ (2010 a 2013), chegando a uma conclu-

são que é possível utilizar o modelo SWAT aplicado à BHRI. Embora o ajuste tenha chegado a resultados satisfatórios, segundo a classificação sugerida por Moriasi et al. (2007). Os dados de chuva utilizados em seu estudo, tiveram limitações tanto pela quantidade de estações consideradas, como pelos (gap's) de informações nos dados, fatores que influenciaram diretamente nos resultados do modelo.

Durães (2010) realizou estudos de avaliação o estresse hidrológico na bacia do Rio Paraopeba (10.222 km²), considerando as séries históricas do período entre 1983 a 2005. Os período de 1983 - 1989 e 2000 - 2005 foram utilizados para calibração e validação, respectivamente. Os dados de chuva e vazão foram obtidos da ANA e os demais dados climáticos foram obtidos pelo INMET. Durães (2010) utiliza para análise de desempenho do modelo o coeficiente Nash-Sutcliffe, que teve resultados superiores a 0,75 tanto na fase de calibração, como de validação. Isso demonstra que o modelo ajustado pode simular adequadamente os impactos hidrológicos observados na bacia do Rio Paraopeba.

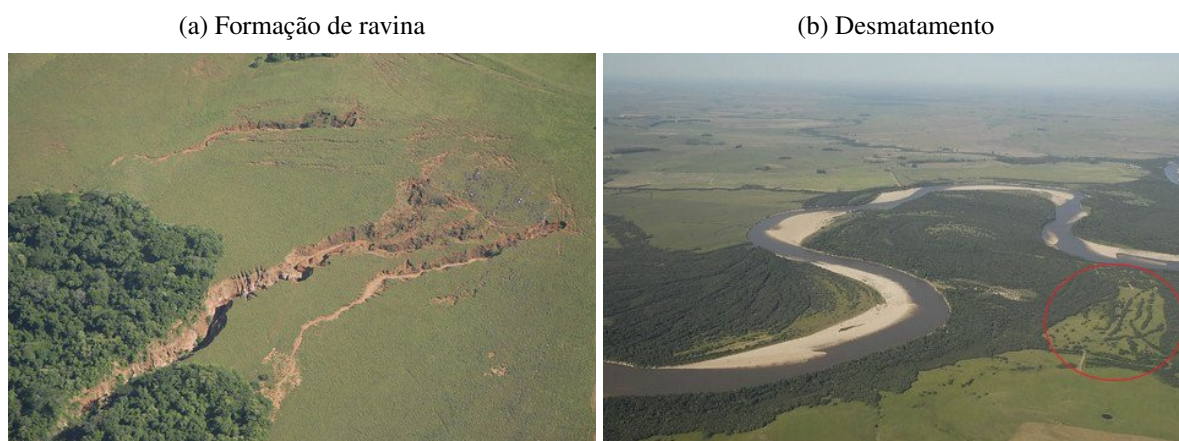
Salles (2012) avaliou o desempenho do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Ribeirão Pibiripau (235 km²) no Distrito Federal, utilizando as séries de vazão médias mensais da estação FRINOCAP(ANA-60473000) do período entre 1989 a 1998 para calibração e de 1999 a 2008 na validação. Os parâmetros classificados como "muito importantes", ou seja, os mais sensíveis, fora *CN2* e *RCHRG_DP* e os resultados obtidos foram um coeficiente NSE de 0,67 e PBIAS=-6,70%, indicando um bom ajuste entre as vazões simuladas e as observadas.

PEREIRA (2013) teve como objetivo, calibrar e validar o modelo SWAT aplicado a bacia hidrográfica do Rio Pomba (8.600 km²), tendo como exutório o posto fluviométrico Astolfo Dutra (ANA-02142000). O período utilizado nesta análise foi de 1995 a 1999, para calibração, e 2000 a 2004, para validação. Os resultados de PEREIRA (2013) apresentaram um NSE e PBIAS de 0,73, -1,8% e 0,76, 5,1% nas etapas de calibração e validação, respectivamente. Isso, comparado a outros trabalhos, indica que o modelo pode ser utilizado para previsões de vazão, que foi o objetivo da pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como já mencionado, para a análise da aplicabilidade do modelo SWAT à bacias grandes e médias da Bioma Pampa, foi escolhido como estudo de caso a Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, que sofre com altos índices de desmatamento erosivos, como podem ser observados nas Figuras 3a e 3b. Foi definido como exutório da bacia a estação fluviométrica Passo Mariano Pinto (76800000), em função da disponibilidade de dados. Na sequência a bacia será descrita para posteriormente proceder a descrição da própria metodologia.

Figura 3 – Erosão e desmatamento na BHRI



Fonte: Comitê Ibicuí

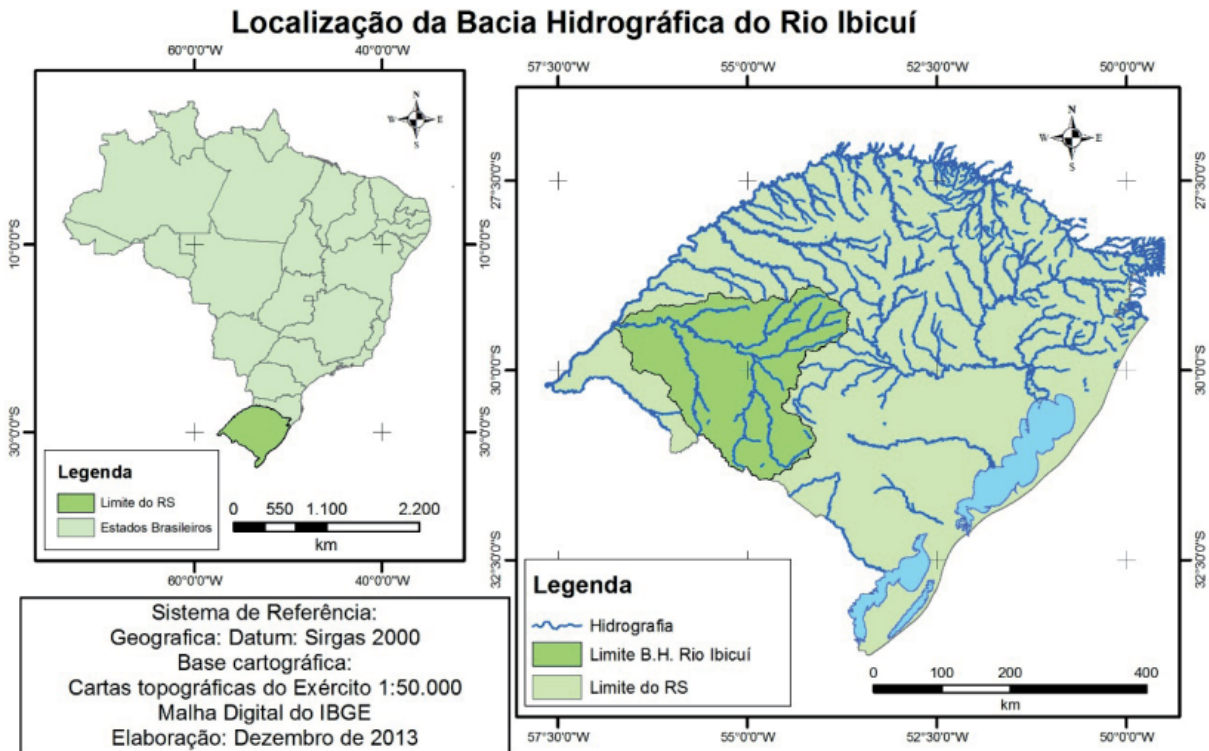
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Ibicuí, (Figura 4), está situada no sul do Brasil e oeste do estado do Rio Grande do Sul, localizada entre as coordenadas geográficas $28^{\circ}53'$ a $30^{\circ}51'$ de latitude Sul e $53^{\circ}39'$ a $57^{\circ}36'$ de longitude Oeste. Limita-se ao norte com as bacias do Rio Butuí-Icamaquã, Piratinim e Ijuí, ao sul com as bacias do Rio Quaraí e Santa Maria, a leste com as bacias do Alto e Baixo Jacuí, Vacacaí - Vacacaí Mirim e a oeste com o Rio Uruguai na fronteira com a Argentina. O Rio Ibicuí tem como principal tributário o Rio Santa Maria e, além deste, também são afluentes os rios: Toropi, Ibicuí-Mirim, Jaguari, Itu e o Rio Ibirapuitã. A área de drenagem da delimitação objeto deste estudo é de $42.652,72 \text{ km}^2$. Importante destacar que aos fins de gestão a bacia foi subdividida em duas diferentes unidades: A bacia do Ibicuí (SEMA-U050) e a bacia do Rio Santa Maria (SEMA-U070), na porção sudeste da bacia.

O bacia está situada em uma região de clima subtropical úmido segundo Koppen (1936), classificada como Cfa. Este clima apresenta temperaturas médias superiores a 22°C no verão e temperaturas médias no mês mais frio entre 0°C e 18°C . Os principais sistemas formadores de chuva são os convectivos de mesoescala (com maior predominância durante a primavera), frequentemente associadas às precipitações intensas, além das chuvas frontais mais recorrentes no período do inverno, sendo intensa na chegada do sistema e com menor intensidade e maior

duração após o início das precipitações (ALVARES et al., 2013; BASSO et al., 2019; REBOITA et al., 2010). A precipitação média anual para o período de 2011 a 2020, considerando as estações utilizadas no processo de modelagem, foi de 1675mm.

Figura 4 – Mapa de localização da BHRI



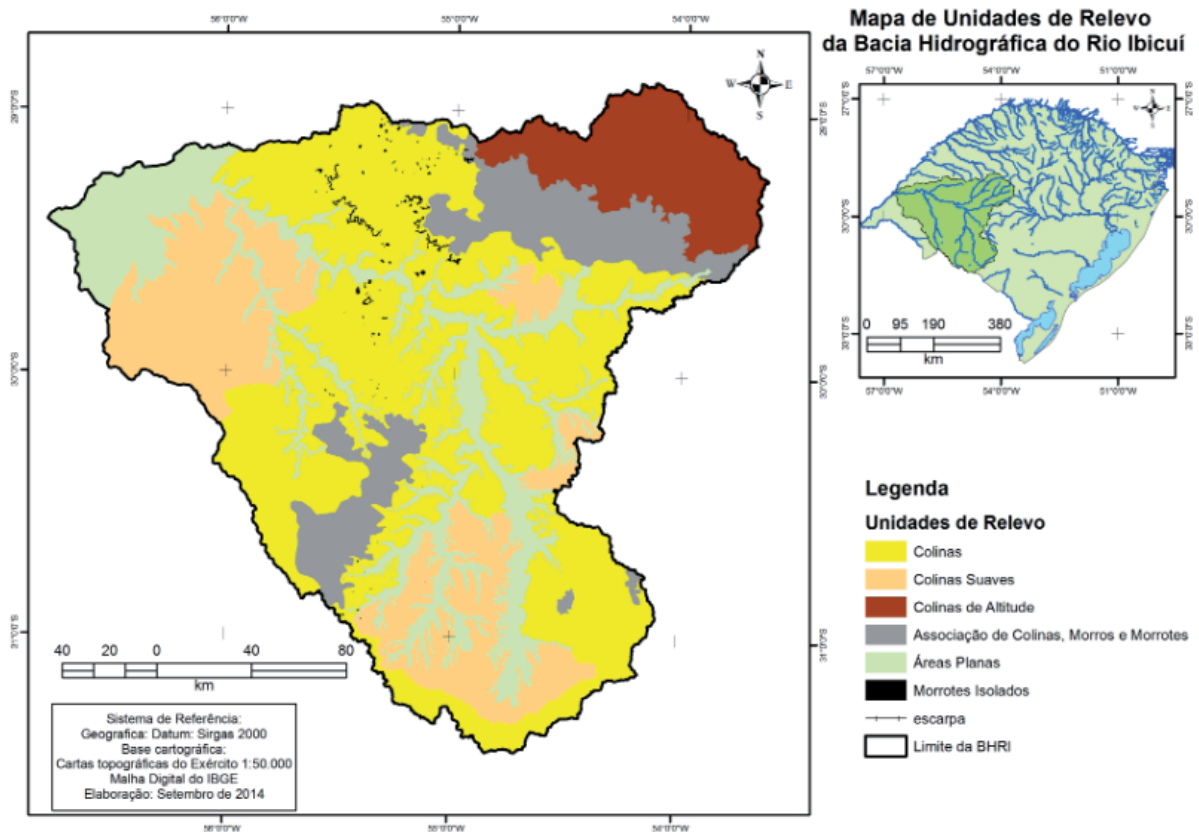
Fonte: (ROBAINA et al., 2015)

3.2 RELEVO

A bacia do Rio Ibicuí está geomorfologicamente inserida nas unidades da Depressão Periférica do Rio Grande do Sul, do Planalto da Serra Geral e uma pequena parte, a sudeste, do Escudo Sul-riograndense (ROBAINA et al., 2010). Ao analisar os atributos do relevo como altitude, amplitude, declividade e forma das encostas, Robaina et al. (2015) definiram quatro formas de relevo para a BHRI, sendo elas: as áreas planas, as colinas, os morros e morrotes, conforme apresentados na Figura 5.

As áreas planas, encontradas nos vales dos grandes rios da região são caracterizadas por declividades menores que 2%. As colinas, com amplitudes variando de 20m a 60m, são as formas mais encontradas na BHRI e foram subdivididas em três: as colinas de altitude, localizadas no Planalto da Serra Geral e apresentam declividades entre 2% e 15% (altitudes variando de 300 m a 546 m), as colinas suaves, apresentam declividades entre 2% e 5%, e as próprias colinas com declividades entre 5% e 15%. Os morros e morrotes são as encostas com declividades superiores a 15%, distinguindo-se entre amplitudes superiores a 100m nos morros, e inferiores a 100m nos morrotes. Estão localizados no centro-sul da BHRI onde formam um alinhamento

Figura 5 – Mapa de Unidades de Relevo da BHRI



Fonte: (ROBAINA et al., 2015)

estrutural denominado "Serra do Caverá" e nas transições entre o Planalto e a Depressão Periférica (ROBAINA et al., 2015). Embora existam estudos de classificação de relevo citados anteriormente, este estudo utilizou um modelo digital de elevação (DEM) da *Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)*, disponibilizado em formato de *raster* com resolução de 90 m. O DEM foi utilizado para delimitação da bacia, bem como, para separação das sub-bacias, geração das direções de fluxos e redes de drenagem. É possível observar que o ponto mais alto da bacia está a uma altitude de 531m e o ponto mais baixo está na altitude 54m. Para fins de simulação no modelo SWAT foram estipuladas 4 diferentes classes de elevação, conforme apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação da declividade da BHRI

Declividade(%)	Área Km ²	% do total
0-5	27.048,13	63,41
5-15	13.932,65	32,66
15-45	1.632,231	3,83
>45	40,70489	0,10
Total	42.653,72	100

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 PEDOLOGIA

Boa parte do Rio Ibicuí tem seu curso em terrenos paleozoicos da bacia sedimentar do Paraná (Depressão Central). O curso médio inferior ocorre no capeamento basáltico, de pouca consistência. O alagamento das margens, várzeas e campos de pastagens ocorre devido ao escoamento mais lento, em razão de declives menores (VIEIRA, 1984).

Para construir o banco de dados de solos da BHRI, *a priori*, utilizou-se o programa *Harmonized World Soil Database Viewer HWSD*, onde algumas propriedades básicas do solo foram obtidas, como porcentagem de carbono orgânico, afloramentos rochosos, além de, porcentagem de argila, silte e areia. *A posteriori*, essas propriedades foram utilizadas em uma função de pedotransferência, com objetivo de compatibilização do banco de dados de solos do SWAT, com os solos brasileiros.

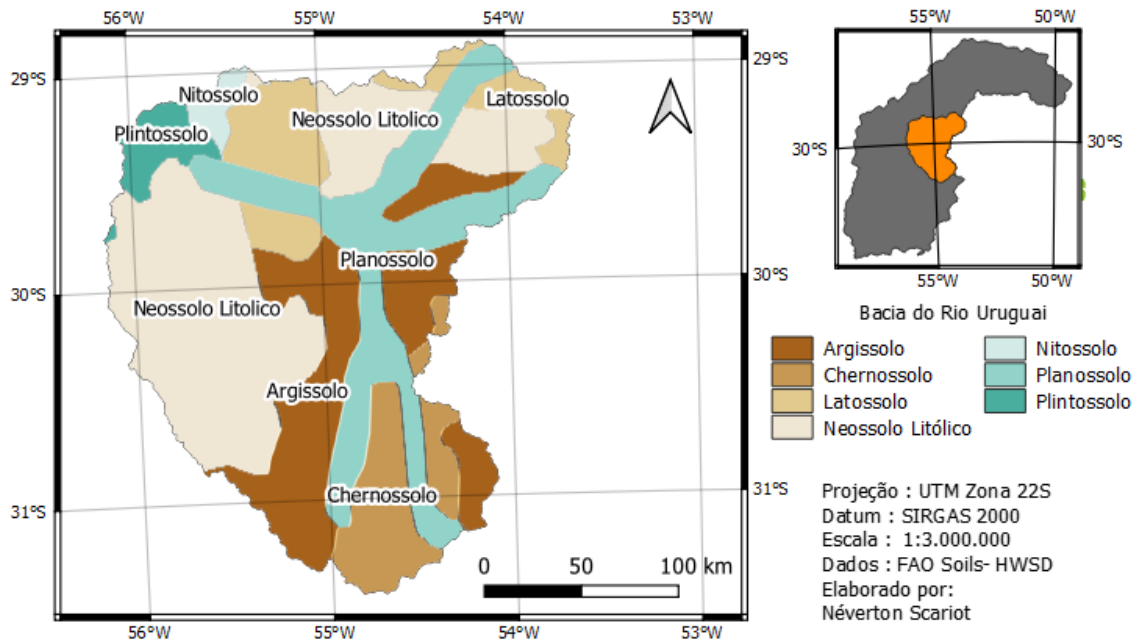
Como pode ser observado na Figura 6, o tipo de solo mais encontrado na BHRI são os Neossolos, localizados na parte norte e oeste. Os argissolos se concentram na parte centro-leste da bacia, enquanto nos fundos aluviais encontram-se os Planossolos. Os Latossolos, Nitossolos e Plintossolos ocupam principalmente o noroeste da BHRI. Os Chernossolos ocupam predominantemente a sub-bacia do Rio Santa Maria e os demais solos ocupam pouquíssimos espaços (FAUCONNIER, 2017). A tabela 4 apresenta a composição dos solos nos horizontes A e B, bem como, apresentam a profundidade de cada horizonte, a porcentagem de carbono orgânico e a classificação hidrológica, seguindo as recomendações de Sartori, Neto e Genovez (2005).

Tabela 4 – Classificação do Solo da BHRI

SiBCS	Planossolo	Latossolos	Argissolos	Neossolos Litólicos	Plintossolos	Nitossolo	Chernossolo
WRB/FAO	Planosols	Ferralsols	Alisols	Leptosols	Plinthosols	Nitisols	Phaeozems
Horizonte A							
Profundidade (cm)	0-30	0-30	0-30	0-30	0-30	0-30	0-30
Argila (%)	9	11	26	17	26	50	43
Silte (%)	27	10	28	28	41	41	42
Areia (%)	64	79	46	55	33	9	15
C Orgânico (% peso)	0,5	0,7	2,83	1,3	1,27	1,6	1,68
HSG	C	C	C	D	C	D	C
Horizonte B							
Profundidade (cm)	30-100	30-100	30-100	-	30-100	30-100	30-100
Argila (%)	17	15	32	-	50	69	53
Silte (%)	26	6	24	-	32	25	39
Areia (%)	57	79	44	-	18	6	8
C Orgânico (% peso)	0,23	0,29	1,13	-	0,59	0,8	0,76
HSG	C	C	C	-	C	D	C

Fonte: FAO adaptado pelo autor(2023)

Figura 6 – Mapa de solos - BHRI



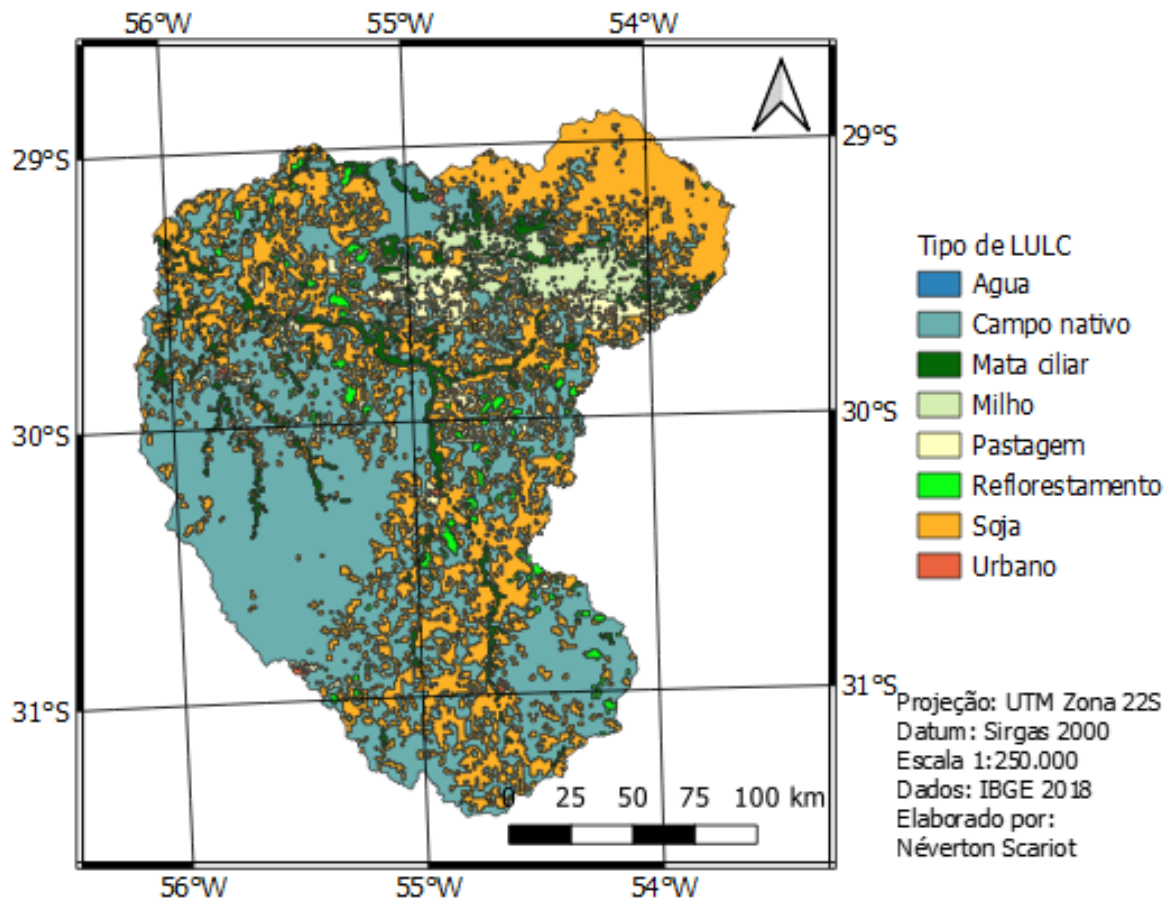
Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 USO E COBERTURA DA TERRA

A região do Pampa tem convertido mais de 16% das áreas de vegetação natural para áreas agrícolas apenas nas últimas 2 décadas. A vegetação nativa, constituída principalmente por arbustos baixos e gramíneas, em 1985 ocupava 61,3% da área do Pampa e em 2021 ocupa apenas 43,2%, segundo MapBiomias (2021). Estas áreas nativas são utilizadas, principalmente para a pecuária extensiva de gado, no entanto, têm cedido espaços para o crescimento de áreas de cultivo de soja, arroz e milho (PETSCH et al., 2022; MENGUE et al., 2018; SUERTEGARAY, 2011; CORBONNOIS et al., 2014; BOLDRINI; EGGERS, 1996). Para fins de modelagem utilizou-se o mapa de LULC disponibilizado pelo IBGE para o ano de 2018 na escala 1:250.000 e seus usos estão apresentados na Figura 7.

A Tabela 5 apresenta as áreas ocupadas por cada classe considerada, assim como as suas participações percentuais na área total da Bacia do Rio Ibicuí. É possível observar que as áreas ocupadas com agropecuária e campo nativo são as coberturas predominantes na BHRI, correspondendo juntas a mais de 80% da área total.

Figura 7 – Mapa de Uso e Cobertura da Terra - BHRI



Fonte: IBGE (2018)

Tabela 5 – Classes de uso e ocupação do solo na BHRI

Classe de LULC	Área (ha)	Área (Km ²)	% da bacia
Corn ->CORN	154745.57	1547.46	3.63
Soybean ->SOYB	1351193.21	13511.93	31.68
Pine ->PINE	72833.74	728.34	1.71
Range-Grasses ->RNGE	2281166.30	22811.66	53.48
Water ->WATR	2616.80	26.17	0.06
Residential ->URBN	9081.31	90.81	0.21
Forest-Evergreen ->FRSE	209733.08	2097.33	4.92
Pasture ->PAST	184001.75	1840.02	4.31
Total	4265371.76	42653.71	100

Fonte: Elaborada pelo autor

3.5 DADOS HIDRO-CLIMÁTICOS

A obtenção dos dados de precipitação foi realizada utilizando a biblioteca Python HydroBR (CARVALHO, 2020), que conta com ferramentas de análise de disponibilidade de dados, através de gráficos tipo Gantt, bem como, automatiza os processos de *download*, uma vez que está vinculada aos metadados da ANA. O modelo foi alimentado com dados brutos de 28 estações pluviométricas, dessas, 11 estações foram utilizadas e estão apresentadas na Figura 9 e Tabela 6, também é possível observar na Figura 8 a disponibilidade dos dados de precipitação, um ponto que foi importante para escolha do período de simulação, sendo que esse foi definido entre 01 de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2020.

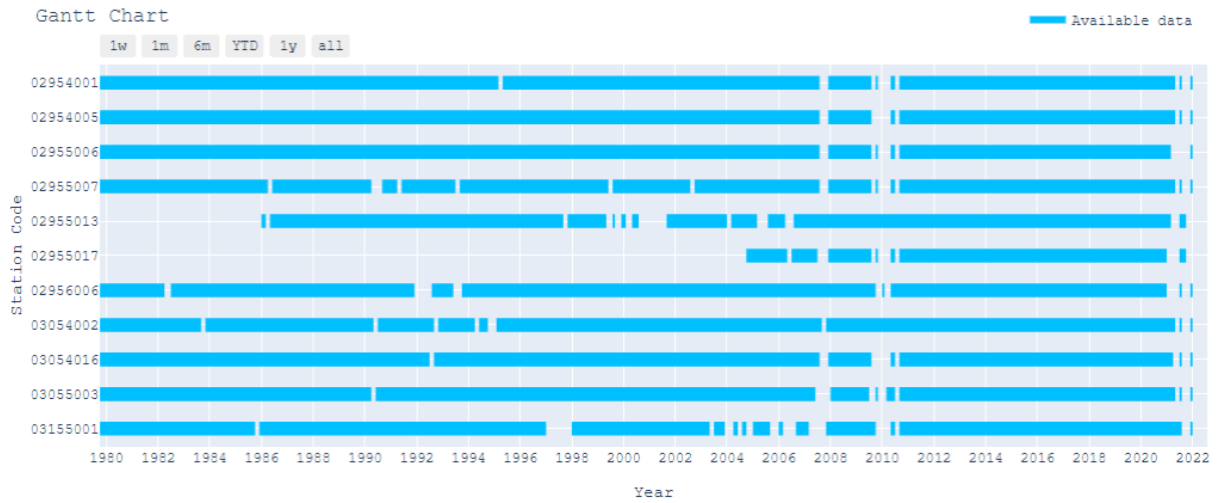
Tabela 6 – Estações pluviométricas utilizadas pelo SWAT

Código	Nome Estação	Responsável	Latitude	Longitude	Altitude(m)
02954001	Cacequi	ANA	-29.8786	-54.8253	100
02954005	Furnas do segredo		-29.3589	-54.5019	300
02955006	Ponte do Miracatu		-29.4592	-55.2911	100
02955007	Unistalda		-29.0475	-55.1511	380
02955013	Alegrete		-29.7844	-55.7739	80
02955017	São João		-29.8319	-55.3433	167
02956006	Passo Mariano Pinto		-29.3089	-56.0553	60
03054002	Dom Pedrito		-30.9781	-54.6758	120
03054016	Granja Umbu		-30.5144	-54.7703	100
03055003	Fazenda Encerra		-30.6956	-55.8414	300
03155001	Três Vendas		-31.2753	-55.0372	240

Fonte: Metadados Agência Nacional de Águas e Saneamento básico(2023)

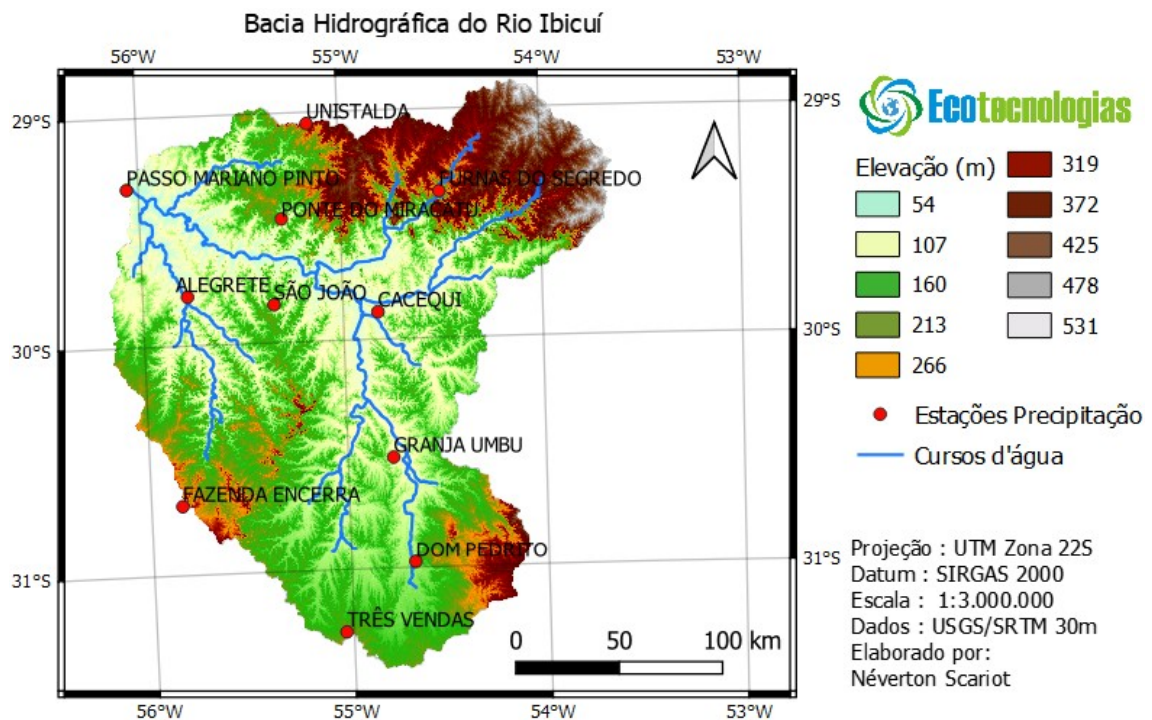
Enquanto o estudo realizado por Fauconnier (2017) utilizou 4 estações pluviométricas, esse estudo considerou 28 estações (11 selecionadas), além disso, a escolha das estações passou por um processo rigoroso de seleção, baseado em uma avaliação da disponibilidade de dados e definição do período de estudo onde as lacunas de dados foram praticamente inexistentes.

Figura 8 – Gráfico de disponibilidade de dados pluviométricos



Fonte: (CARVALHO, 2020) adaptado pelo autor

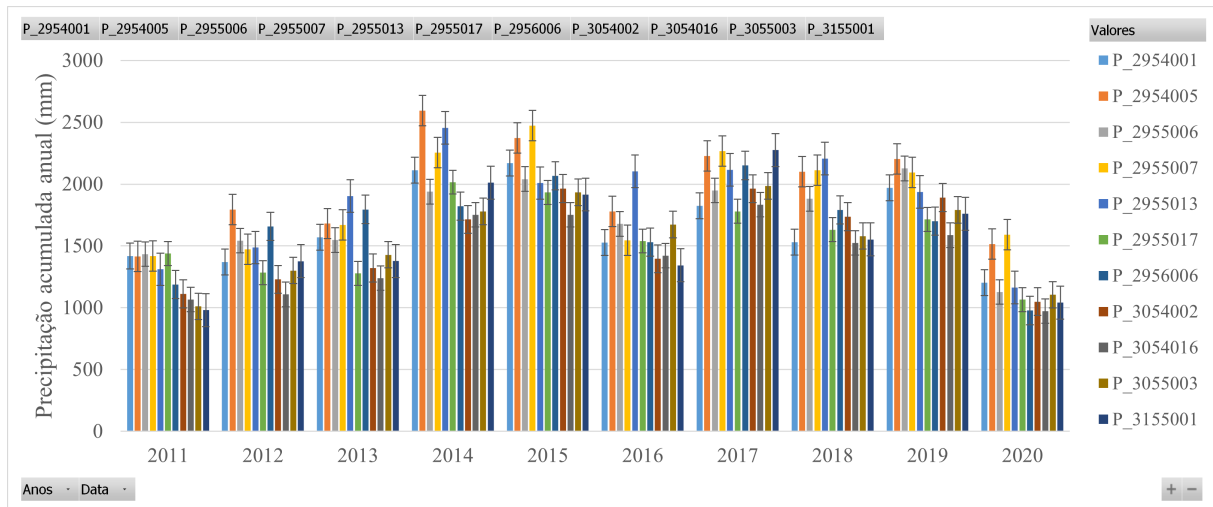
Figura 9 – Mapa de elevação com estações de precipitação utilizadas pelo modelo SWAT



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma vez obtidos os dados de precipitação, realizou-se um pré-processamento, visto que, o modelo SWAT exige uma formatação específica de entrada dos dados. Neste processo foram preenchidas as falhas de informações de precipitação com o valor de -999, pois o modelo identifica nas simulações este valor como falha. Na Figura 10 estão apresentadas as precipitações acumuladas anuais para cada posto pluviométrico utilizado na modelagem

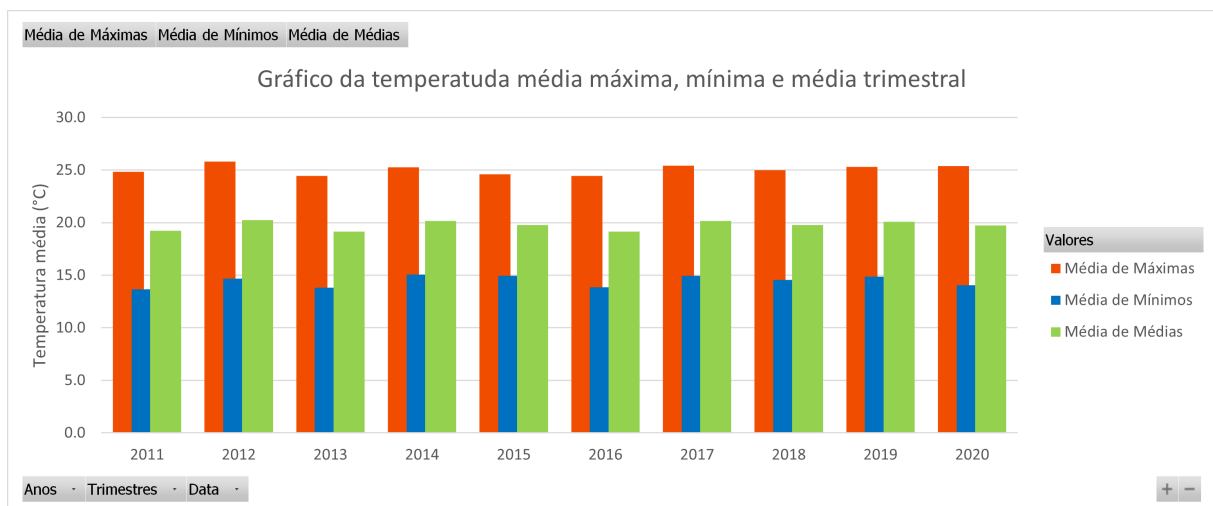
Figura 10 – Precipitação anual acumulada para o período de 2011 a 2020



Fonte: Elaborado a partir dos dados da ANA

Os dados de temperatura utilizados para simulação do modelo SWAT foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia INMET da estação A833 instalada em Santiago-RS e estão apresentados na Figura 11. Os dados climáticos de radiação solar, umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m/s) foram simulados pelo banco de dados do próprio modelo SWAT.

Figura 11 – Temperatura máxima, mínima e média para a BHRI

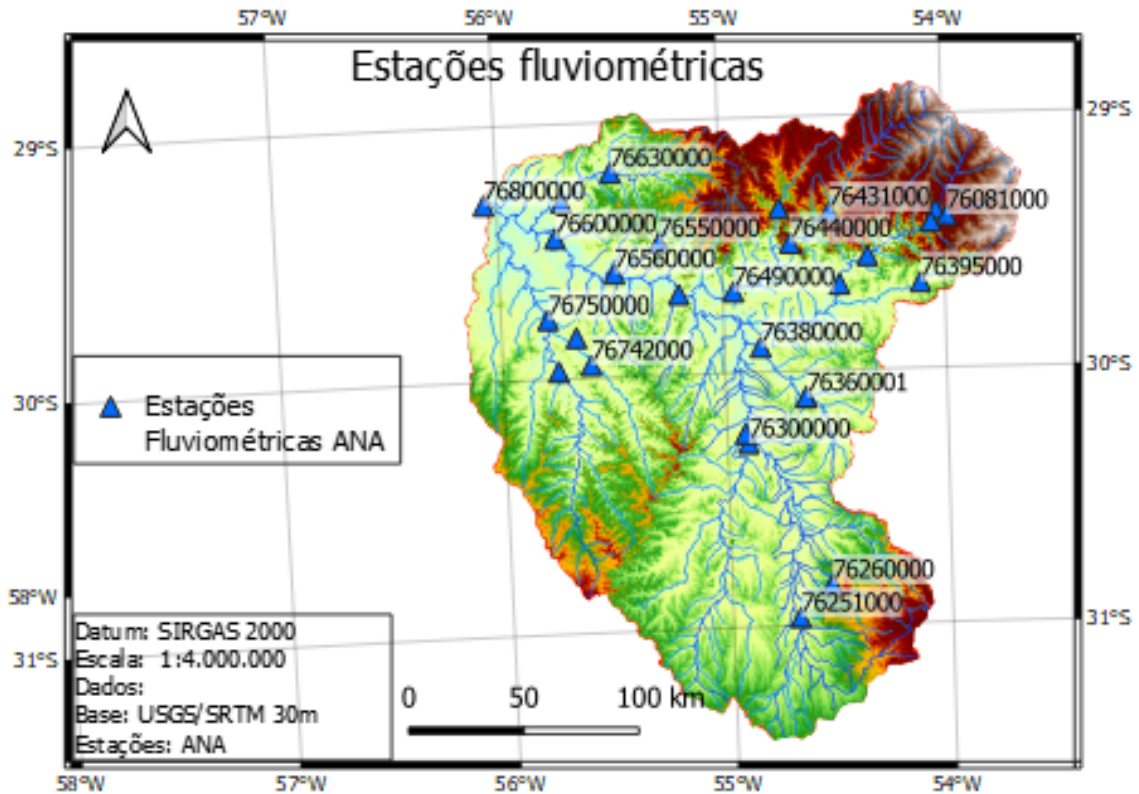


Fonte: INMET (2022)

Os dados de vazão, também obtidos através da biblioteca HydroBR, como os de precipitação, não foram consistidos durante o processo de tratamento, assim como não foram realizadas verificações adicionais, dessa forma, não se dispõem de informações como, por exemplo, extrapolações da curva-chave, o que pode introduzir incertezas nos resultados. A estação 76800000 de responsabilidade da ANA foi utilizada como referência ao realizar a comparação das vazões

observadas e simuladas. Na figura 12 é possível observar a localização das estações fluviométricas instaladas na BHRI.

Figura 12 – Mapa de localização das estações fluviométricas



Fonte: Elaborado pelo autor

3.6 AJUSTE DO MODELO SWAT

Para configuração do modelo SWAT foi utilizado o plugin ArcSWAT, no qual a bacia foi delimitada, sendo essa dividida em 31 sub-bacias e 406 unidades de resposta hidrológica (HRUs). O modelo foi simulado com passo de tempo diário no período de 2011 a 2020, sendo que, os anos de 2011 e 2012 foram configurados para aquecimento do modelo (*warm-up*), e os anos de 2013 a 2018 foram configurados para calibração. Posteriormente, os melhores parâmetros (calibrados) foram transferidos para uma nova simulação, nos anos de 2019 e 2020, assim validando o modelo. A evapotranspiração potencial foi calculada usando o método de Penman-Monteith (Equação 2.8) e o escoamento superficial foi estimado usando o método de Green & Ampt adaptado por Nearing et al. (1996) com incorporação do parâmetro CN para o cálculo da condutividade hidráulica.

O procedimento de análise de sensibilidade de parâmetros, calibração e validação foi realizado usando o *Sequential Uncertainty Algorithm (SUFI-2)* no programa *SWAT-Calibration and Uncertainty Program (SWAT-CUP)* (ABBASPOUR; JOHNSON; GENUCHTEN, 2004) vinculado a saída de dados do modelo SWAT. Como apontam Rouholahnejad et al. (2012) o

SUF12 aplica o método do hipercubo latino para definição dos parâmetros e o processo parte de uma faixa de valores iniciais que o usuário define. Esse processo é iterado de acordo com a necessidade do projeto, no entanto, Abbaspour et al. (2007) recomendam que configuradas 1500 iterações, para diminuir a faixa de incertezas no ajuste dos parâmetros. Cabe destacar que, no processo de calibração, o SWAT-CUP apresenta faixas de valores absolutos que não devem ser extrapolados, por se tratar de um modelo de base física, em que as faixas de valores devem ser coerentes com os fenômenos observados na bacia (ABBASPOUR; JOHNSON; GENUCHTEN, 2004).

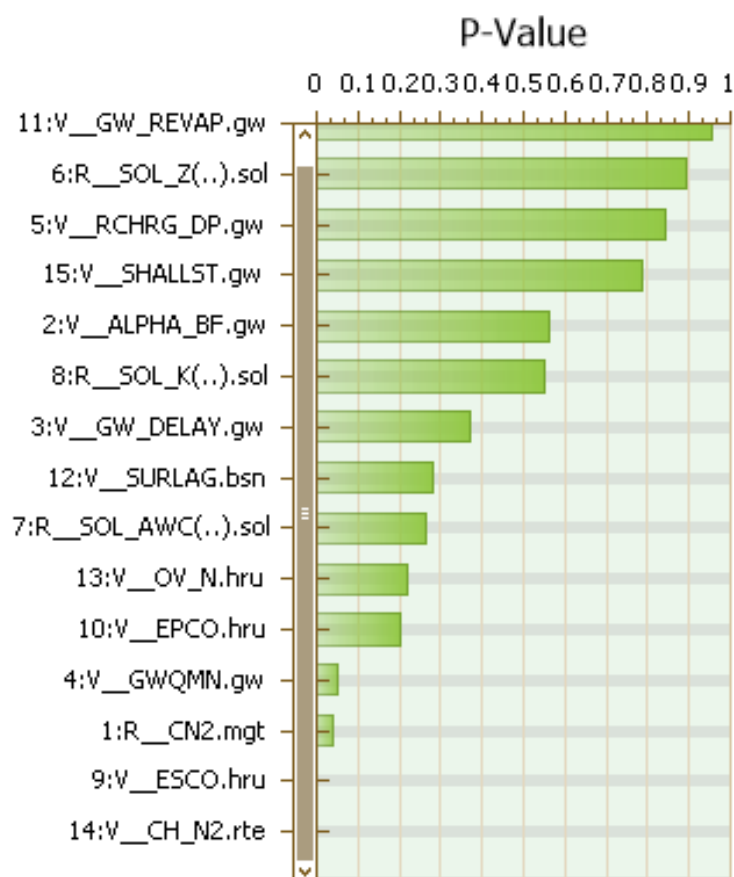
Foram selecionados 15 parâmetros com base nos trabalhos de Rippel et al. (2020), Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016). O processo de calibração foi realizado em 3 simulações, cada uma com 200 iterações, embora (ABBASPOUR et al., 2007) recomende uma quantidade maior de iterações, por limitações de processamento computacional as iterações foram diminuídas. Inicialmente, foram considerados os limites absolutos de valores padrão do SWAT, e a cada rodada de simulação, as faixas de valores dos parâmetros foram estreitadas de acordo com a melhor simulação anterior, com o intuito de diminuir a faixa de incerteza dos parâmetros.

A função objetivo utilizada no processo de calibração foi o coeficiente de eficiência NSE, sendo que, segundo Moriasi et al. (2007) a escolha de utilização do NSE apresenta um melhor ajuste na representação das vazões altas, não ajustando com muita precisão as vazões médias e baixas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 7 podem ser observados os parâmetros calibrados, sendo que, os com valores baixos de P-Value são considerados os mais sensíveis (ABBASPOUR et al., 2015), e os mesmos podem ser observados no gráfico da Figura 13. Os parâmetros que tiveram p-value menores ou próximos a 5% foram *CN_N2.rte*, *ESCO.hru*, *CN2.mgt* e *GWQMN.gw*. Sendo que *CN_N2.rte* está relacionado ao coeficiente de rugosidade do canal. O parâmetro *ESCO.hru* controla a contribuição de água do solo para evapotranspiração. O parâmetro *CN2.mgt* está relacionado ao escoamento superficial e é essencial para o cálculo do balanço hídrico, embora o cálculo do escoamento superficial tenha sido estimado pelo método de infiltração de Green & Ampt, foram incorporados as características de cada HRU utilizando uma fórmula empírica apresentada na Equação 2.5. E por último, o parâmetro *GWQMN.gw* regula a ocorrência de água subterrânea.

Figura 13 – Análise de sensibilidade de parâmetros P-Value



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das saídas do SWAT-CUP

Tabela 7 – Descrição dos parâmetros calibrados, intervalos fisicamente observados, bem como análise final de sensibilidade

Tipo	Parâmetro	Descrição	Intervalo		Valor calibrado	Sensibilidade P-Value
			fisicamente obs.			
V ¹	ESCO.hru	Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo	0	1	0.0218	0.0023
V	CH_N2.rte	Coeficiente de Manning para o canal principal	-0.01	0.3	0.1183	0.0181
V	GWQMN.gw	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)	0	5000	1499.1128	0.0494
R ²	CN2.mgt	NRCS Curve number para condição de umidade do solo II	35	98	-0.0259	0.0686
V	GW_DELAY.gw	Intervalo de tempo para recarga do Aquífero (dias)	0	500	252.9935	0.2855
V	OV_N.hru	Coeficiente de Manning para o escoamento superficial	0.01	1	0.2770	0.3112
V	EPCO.hru	Coeficiente de compensação de crescimento da planta	0	1	0.4605	0.3964
V	ALPHA_BF.gw	Constante de recessão do escoamento de base	0	1	0.8796	0.4561
R	SOL_K.sol	Condutividade hidráulica	0	2000	0.0361	0.5142
V	RCHRG_DP.gw	Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo	0	1	0.5985	0.5711
R	SOL_AWC.sol	Capacidade de água disponível	0	1	0.0494	0.6373
V	SURLAG.bsn	Coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto	0.05	24	12.5239	0.7341
R	SOL_Z.sol	Profundidade da camada de solo	0	3500	0.0979	0.7370
V	GW_REVAP.gw	Coeficiente de ascensão de água à zona de saturação	0.02	0.2	0.1703	0.8114
V	SHALLST.gw	Profundidade inicial da água de aquífero raso (mm)	0	50000	13690.	0.8722

¹ V são parâmetros redefinidos como novos valores, ² R são parâmetros calibrados com alteração relativa

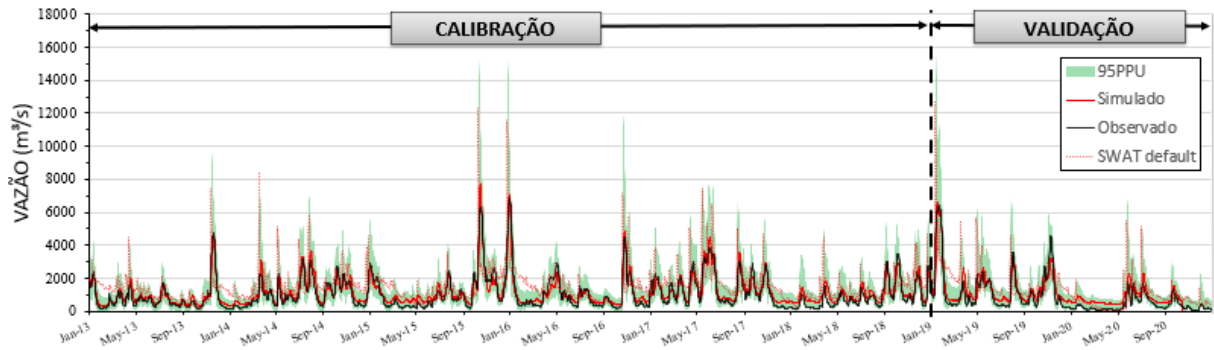
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados do SWAT-CUP (ABBASPOUR et al., 2007)

A Figura 14 apresenta o hidrograma com os dados observados ANA, bem como, os dados simulados do modelo sem calibração (*default*) e pós processo de calibração (2013-2018) e validação (2019-2020). Também é possível observar a faixa de incerteza do modelo (95PPU).

A calibração e a validação obtida pelo modelo SWAT (Figura 14 e Tabela 8) apresentam resultados considerados "muito bona" para a estimativa da vazão na bacia do Rio Ibicuí, verificadas na estação Passo Mariano Pinto (76800000). Por exemplo, no ajuste do modelo SWAT desenvolvido no trabalho de Fauconnier (2017), o modelo subestimou as vazões de pico, superestimou as vazões de base, além disso, as recessões do hidrograma foram representadas com atraso e suavização considerável, diferenciando-se das vazões observadas, onde a recessão é abrupta para a BHRI. No modelo ajustado neste estudo, houve uma ajuste muito próximo nas recessões e picos, no entanto, as vazões de base foram superestimadas. Essa superestima-

ção pode estar associada a função objetivo considerada na calibração, que prioriza o ajuste as vazões de pico.

Figura 14 – Hidrograma de vazão diária observada e simulada no período de calibração e validação



Fonte: Elaborado pelo autor

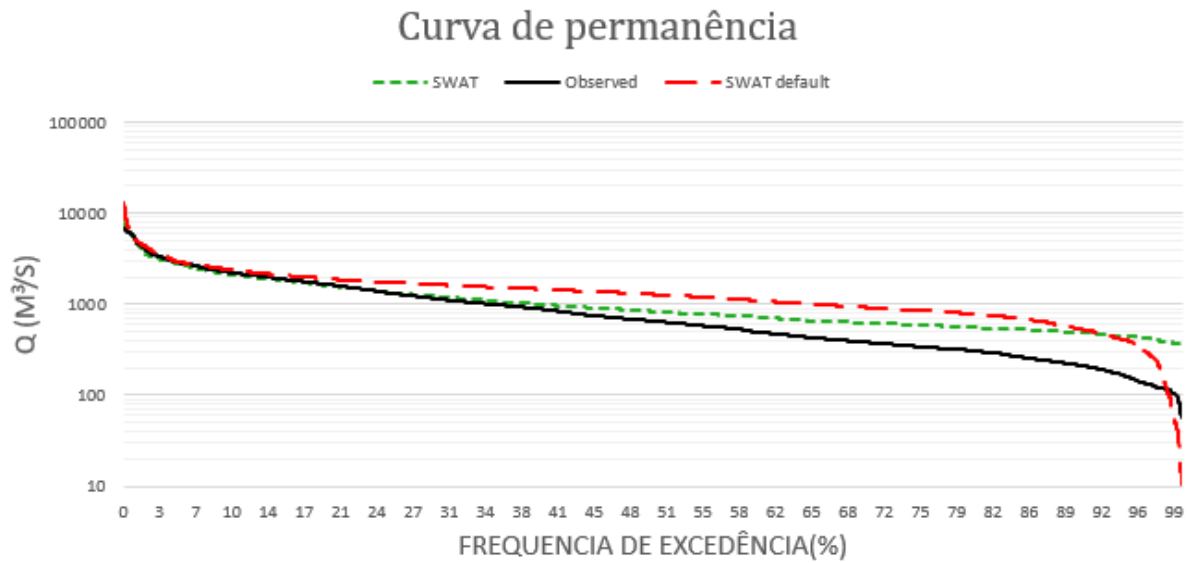
Tabela 8 – Desempenho do modelo classificados pelos índices NSE, PBIAS, R \bar{s} e RSR

	Período	NSE	PBIAS	R \bar{s}
Calibração	2013-2018	0.87	-14.1	0.89
Validação	2019-2020	0.88	-22.2	0.91

Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 15 é possível observar que o ajuste do modelo simulou com maior precisão as vazões de pico, principalmente abaixo de 15% de frequência de excedência, porém, as vazões de base foram superestimadas. Essa superestimação pode estar associada a função objetivo considerada na calibração (NSE), que prioriza o ajuste das vazões de pico ao considerar as diferenças entre as vazões simuladas e observadas ao quadrado, onde os valores de baixas e médias vazões são "negligenciados"(LEGATES; JR, 1999).

Figura 15 – Curva de permanência das vazões observadas e simuladas do período 2013 a 2020

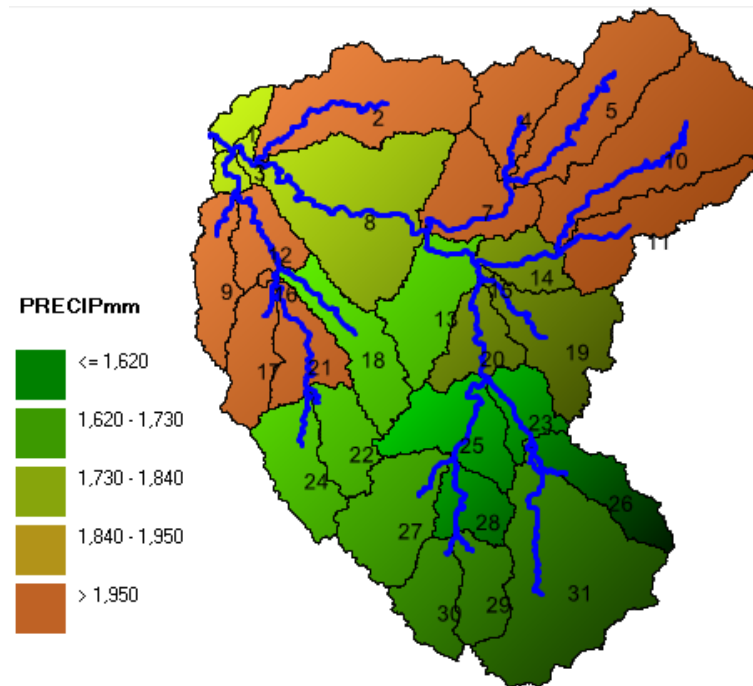


Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO BALANÇO HÍDRICO

O mapeamento a seguir apresenta os componentes do balanço hídrico em cada sub-bacia, sendo que esses foram obtidos do *SWAT output viewer*, a Figura 16 apresenta as entradas de precipitação médias do período de 2013 a 2020, utilizada para o cálculo do balanço hídrico, e pode ser observado que as regiões ao norte tem uma maior contribuição de entradas de água.

Figura 16 – Precipitação média no período entre 2013 e 2020 espacializada por sub-bacia



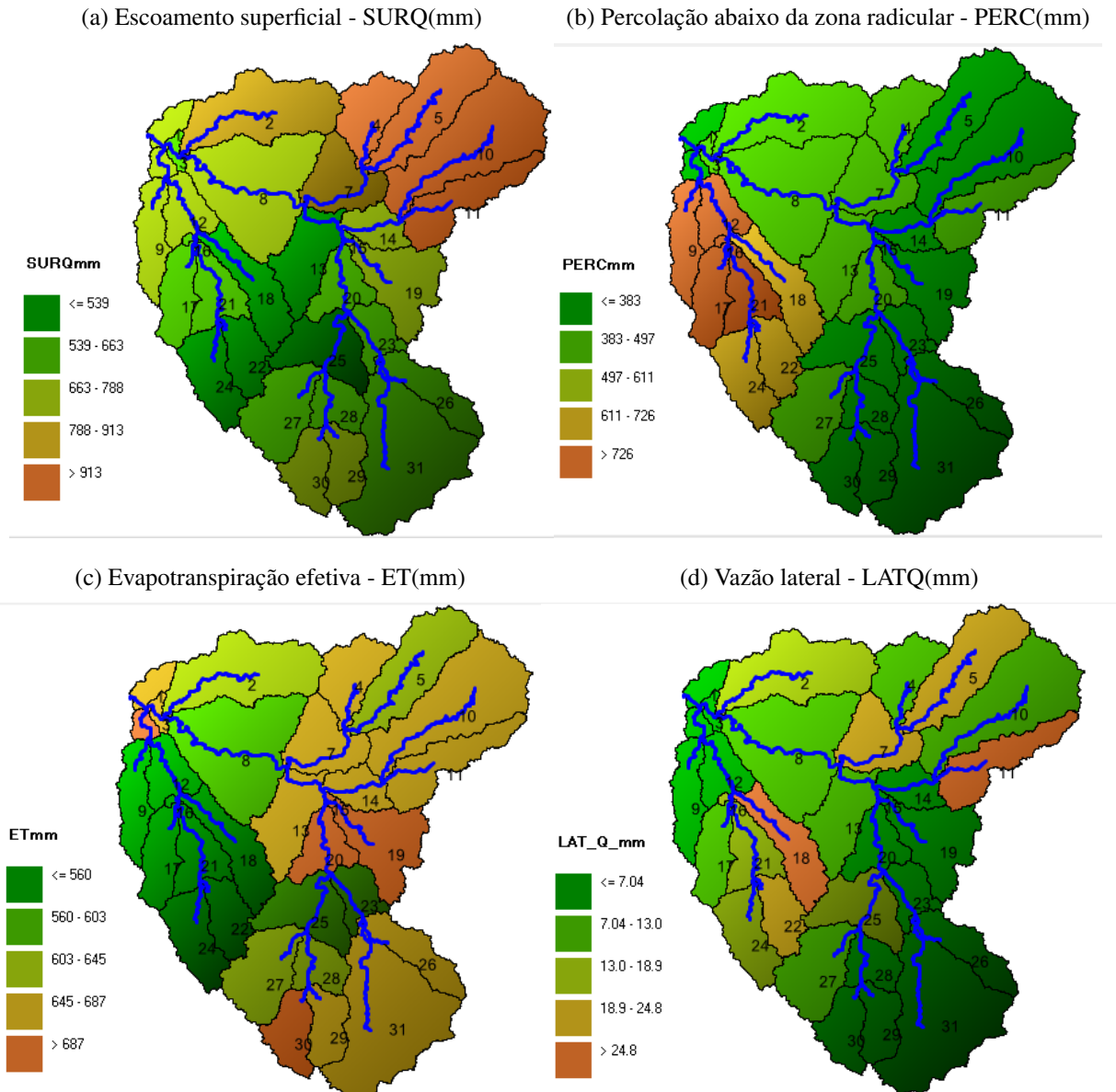
Fonte: Elaborado pelo autor

O escoamento superficial ocorre principalmente na região norte da bacia, visto que, existe uma concentração maior de precipitação, bem como, a declividade é mais acentuada nesta região. Isso pode estar atrelado a associação de colinas conhecida como Serra do Caverá, que impede e dificulta a formação de chuvas na região na bacia do Rio Santa Maria.

No mapa das Figuras 17b e 17d é possível observar que o escoamento subsuperficial ocorre principalmente nas áreas de solo tipo Leptosols (Neossolo Litólico), segundo tradução SiBCS (SOLOS, 2013), isso ocorre pois são solos rasos, onde a profundidade dos horizontes somada, não ultrapassa 50 cm. Além disso, o Neossolo litólico apresenta um alto teor de areia e não possuem horizonte B, segundo os detalhes de mapeamento de solos da FAO. Este mesmo solo é encontrado ao norte da bacia, porém com uma cobertura vegetal de milho e pastagem.

A evapotranspiração efetiva espacializada pela Figura 17c mostra que as regiões aonde ocorrem os plantios sistematizados de arroz irrigado são as que mais contribuem com as saídas de água da superfície para a atmosfera.

Figura 17 – Saídas médias consideradas no cálculo do balanço hídrico (2013 a 2020)



Fonte: SWAT output viewer

Tabela 9 – Balanço hídrico anual no período de 2013 a 2020 com as saídas obtidas do SWAT output viewer

Ano	P(mm)	SURQ(mm)	PERC(mm)	LATQ(mm)	ET(mm)	ΔS (mm)
2013	1579.4	563.2	396.9	9.139	633.2	-23.06
2014	2100.5	826.3	564.8	11.156	671.8	26.39
2015	2058.2	849.2	541.8	10.828	655.6	0.86
2016	1660.0	566.2	435.7	9.875	642.2	6.01
2017	2036.4	836.1	551.2	11.396	662.4	-24.77
2018	1814.8	694.3	473.5	9.845	635.0	2.13
2019	1895.7	790.6	491.6	10.573	614.4	-11.54
2020	1161.2	377.0	251.6	6.692	514.8	11.16

$$\Delta S = P - SURQ - PERC - LATQ - ET$$

Fonte: Obtido pelo software SWAT output viewer

5 CONCLUSÃO

Com esse estudo, concluiu-se que o modelo SWAT após calibrado e validado pode ser aplicado a bacias hidrográficas com problemas complexos como a bacia do Rio Ibicuí, visto que, os resultados evidenciaram que, com uma melhor discretização espaço/temporal e utilização de um banco de dados mais abrangente, foram obtidos resultados mais precisos reduzindo as incertezas do modelo, e tornando-o mais representativo à realidade dos fenômenos que ocorrem na bacia.

Os valores obtidos para os índices de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e de Tendência Percentual (PBIAS) foram considerados "muito bons" nas simulações ao comparar com os hidrogramas observados, o que indica que o modelo pode ser utilizado para previsão de vazões em períodos sem dados.

Dessa forma, embora tenham sido detectadas algumas limitações nos dados de entrada disponíveis, e adotadas algumas simplificações, os resultados obtidos evidenciaram um ótimo potencial de uso do modelo SWAT para a determinação das vazões na região de estudo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação de diferentes parâmetros e um maior número de iterações na calibração, com a finalidade de aperfeiçoar o ajuste do modelo estreitando a faixa de incertezas, bem como, simular cenários hipotéticos de uso e cobertura da terra.

Também fica como sugestão, aumentar as análises para todas as estações fluviométricas (com dados no período) da bacia, identificando erros espaciais na calibração.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. Swat-cup 2012. **SWAT calibration and uncertainty programA user manual**, 2013.
- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C.; GENUCHTEN, M. T. V. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose zone journal**, Wiley Online Library, v. 3, n. 4, p. 1340–1352, 2004.
- ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale swat model. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 524, p. 733–752, 2015.
- _____. Swat-cup calibration and uncertainty programs for swat. In: SWISS FEDERAL INSTITUTE OF AQUATIC SCIENCE AND TECHNOLOGY DÜBENDORF, SWITZERLAND. **MODSIM 2007 international congress on modelling and simulation, modelling and simulation society of Australia and New Zealand**. [S.l.], 2007. p. 1596–1602.
- ALLASIA, D. G. et al. Modelo hidrológico da bacia do alto paraguai. **Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, CD ROM, Goiânia, Brasil**, v. 20, 2004.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017.
- ALVARES, C. A. et al. Köppens climate classification map for brazil. **Meteorologische zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- _____. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley Online Library, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.
- BASSO, R. E. et al. **Estimativa de chuvas intensas em locais sem dados no Rio Grande do Sul**. 2019. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2019.
- BHATTA, B. et al. Evaluation and application of a swat model to assess the climate change impact on the hydrology of the himalayan river basin. **Catena**, Elsevier, v. 181, p. 104082, 2019.
- BIFTU, G.; GAN, T. Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the paddle river basin, alberta, using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 244, n. 3-4, p. 137–156, 2001.
- BOLDRINI, I. I.; EGGERS, L. Vegetação campestre do sul do brasil: dinâmica de espécies à exclusão do gado. **Acta Botanica Brasilica**, SciELO Brasil, v. 10, p. 37–50, 1996.
- BOLFE, É. et al. A evolução histórica dos sistemas de informações geográficas. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011., 2011.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental. Vários autores.** [S.l.]: São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRESSIANI, D. de A. et al. Review of soil and water assessment tool (swat) applications in brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9–35, 2015.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica catarinense. **RBRH**, SciELO Brasil, v. 21, p. 53–64, 2016.

CARVALHO, W. M. de. **HydroBr: A Python package to work with Brazilian hydro-meteorological time series.** Zenodo, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.3931027>>.

CHORDIA, J. et al. Uncertainties in prediction of streamflows using swat model role of remote sensing and precipitation sources. **Remote Sensing**, MDPI, v. 14, n. 21, p. 5385, 2022.

COLLISCHONN, W. et al. The mgb-iph model for large-scale rainfallrunoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, Taylor & Francis, v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007.

CORBONNOIS, J. et al. Lintensification des pratiques agricoles et la mobilisation des ressources naturelles dans la pampa du sud du brésil. **Vertigo: la revue électronique en sciences de l'environnement**, Université du Québec à Montréal, v. 14, n. 1, 2014.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern brazil and implications for land conservation. **Journal of Soils and Sediments**, Springer, v. 15, p. 2334–2346, 2015.

DILE, Y. T. et al. Introducing a new open source gis user interface for the swat model. **Environmental modelling & software**, Elsevier, v. 85, p. 129–138, 2016.

DURÃES, M. F. Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio paraopeba por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

FAUCONNIER, Y. **Evaluation de La Ressource Dans Le Bassin Versant de Libicuí Grâce à La Modélisation Hydrologique: Application de Loutil SWAT.** 2017. Tese (Doutorado) — University of Le Mans Le Mans, France, 2017.

FAYAL, M. A. de A. **Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet.** 2008. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2008.

FERRREIRA, F. F. Avaliação do modelo swat na estimativa da vazão das sub-bacias monitoradas do alto descoberto e simulação de cenários. 2019.

GREEN, W. H.; AMPT, G. Studies on soil physics. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge University Press, v. 4, n. 1, p. 1–24, 1911.

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

KANKAM-YEBOAH, K. et al. Impact of climate change on streamflow in selected river basins in Ghana. **Hydrological Sciences Journal**, Taylor & Francis, v. 58, n. 4, p. 773–788, 2013.

KOPPEN, W. Das geographische system der klimaten. **Handbuch der klimatologie**, Gebrüder Borntraeger, p. 46, 1936.

LEGATES, D. R.; JR, G. J. M. Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, Wiley Online Library, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999.

LOPES, V. A. R. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento. 2017.

MAKWANA, J. J.; TIWARI, M. K. Intermittent streamflow forecasting and extreme event modelling using wavelet based artificial neural networks. **Water resources management**, Springer, v. 28, n. 13, p. 4857–4873, 2014.

MAPBIOMAS, P. Mapeamento anual da cobertura e uso da terra no Brasil (1985-2020). **Destques Cerrado. Setembro de**, 2021.

MARINHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2013.

MEDEIROS, I. C. de; SILVA, R. M. da. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. **Geosciences= Geociências**, v. 33, n. 3, p. 457–471, 2014.

MELLO, C. d.; SILVA, A. d. Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. **Lavras: Ufla**, 2013.

MENGUE, V. P. et al. Detecção de mudanças espaciais relacionadas à expansão da fronteira agrícola no bioma Pampa. **Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro. Vol. 70, n. 1 (jan./mar. 2018), p. 40-70**, 2018.

MORAES, J. M. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 61–70, 2003.

MOREIRA, I. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. 2005. 96 f.** 2005. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestre), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

NASH, J.; SUTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. ISSN 0022-1694.

NEARING, M. et al. Curve numbers and green-ampt effective hydraulic conductivities 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley Online Library, v. 32, n. 1, p. 125–136, 1996.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. [S.l.], 2011.

NETO, F. L. et al. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. **Simpósio Sobre Terraceamento Agrícola**, Fundação Cargill Campinas, Brazil, p. 99–124, 1989.

PEREIRA, D. d. R. Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio pomba usando o modelo swat. 2013., 2013.

PETSCH, C. et al. A expansão da cultura de soja no pampa gaúcho: O caso da bacia hidrográfica do rio santa maria. **REVISTA GEOGRAFAR**, v. 17, n. 1, p. 47–71, 2022.

PIMENTEL, D. et al. Water resources: agricultural and environmental issues. **BioScience**, Oxford University Press, v. 54, n. 10, p. 909–918, 2004.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity? **Journal of hydrologic engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 1, n. 1, p. 11–19, 1996.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na américa do sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, SciELO Brasil, v. 25, p. 185–204, 2010.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Programa de Ciência e Tecnologia para a Gestão de Ecossistemas. Ação Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental. Relatório Técnico Parcial. São Paulo, 60p**, 2000.

RIPPEL, E. C. et al. Utilização do uso e ocupação da terra obtida por sensoriamento remoto na modelagem hidrológica. Universidade Federal de Santa Maria, 2020.

ROBAINA, L. E. de S. et al. Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do ibicuí, rio grande do sul, brasil: proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, 2010.

_____. Zoneamento morfolitológico da bacia hidrográfica do rio ibicuí e sua relação com processos superficiais e o uso do solo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 1, 2015.

RODDA, J. C. **Guide to Hydrological Practices: vol. I: Hydrology From Measurement to Hydrological Information, and vol. II: Management of Water Resources and Application to Hydrological Practices, 2008 and 2009, WMO 168, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland; Price CHF70. 00; ISBN 978-92-63-10168-6**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2011.

ROSSI, C. et al. Hydrologic calibration and validation of the soil and water assessment tool for the leon river watershed. **Journal of soil and water conservation**, Soil and Water Conservation Society, v. 63, n. 6, p. 533–541, 2008.

ROUHOLAHNEJAD, E. et al. A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modelling & Software**, Elsevier, v. 31, p. 28–36, 2012.

SALLES, L. d. A. Calibração e validação do modelo swat para a predição de vazões na bacia do ribeirão pipiripau. 2012.

SANTOS, L. L. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1–19, 2009.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos estados unidos parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05–18, 2005.

SILVEIRA, A. L. d. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. **Hidrologia: ciência e aplicação**, EDUSP São Paulo, v. 4, p. 35–51, 2001.

SOLOS, E. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, v. 3, 2013.

SUERTEGARAY, D. M. A. Erosão nos campos sulinos: arenização no sudoeste do rio grande do sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2011.

TANTAWY, I. et al. The application of the fao water productivity open-access portal (wapor) for the assessment of the water-energy-food nexus in the eastern Nile river basin. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 5356.

TOKAR, A. S.; MARKUS, M. Precipitation-runoff modeling using artificial neural networks and conceptual models. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 5, n. 2, p. 156–161, 2000.

USDA-SCS, S. **National engineering handbook**. [S.l.]: USDA Washington, DC, 1972.

VIEIRA, M. O preparo do solo e o comportamento da planta. **Plantio Direto, Ponta Grossa**, v. 1, n. 5, p. 4–5, 1984.

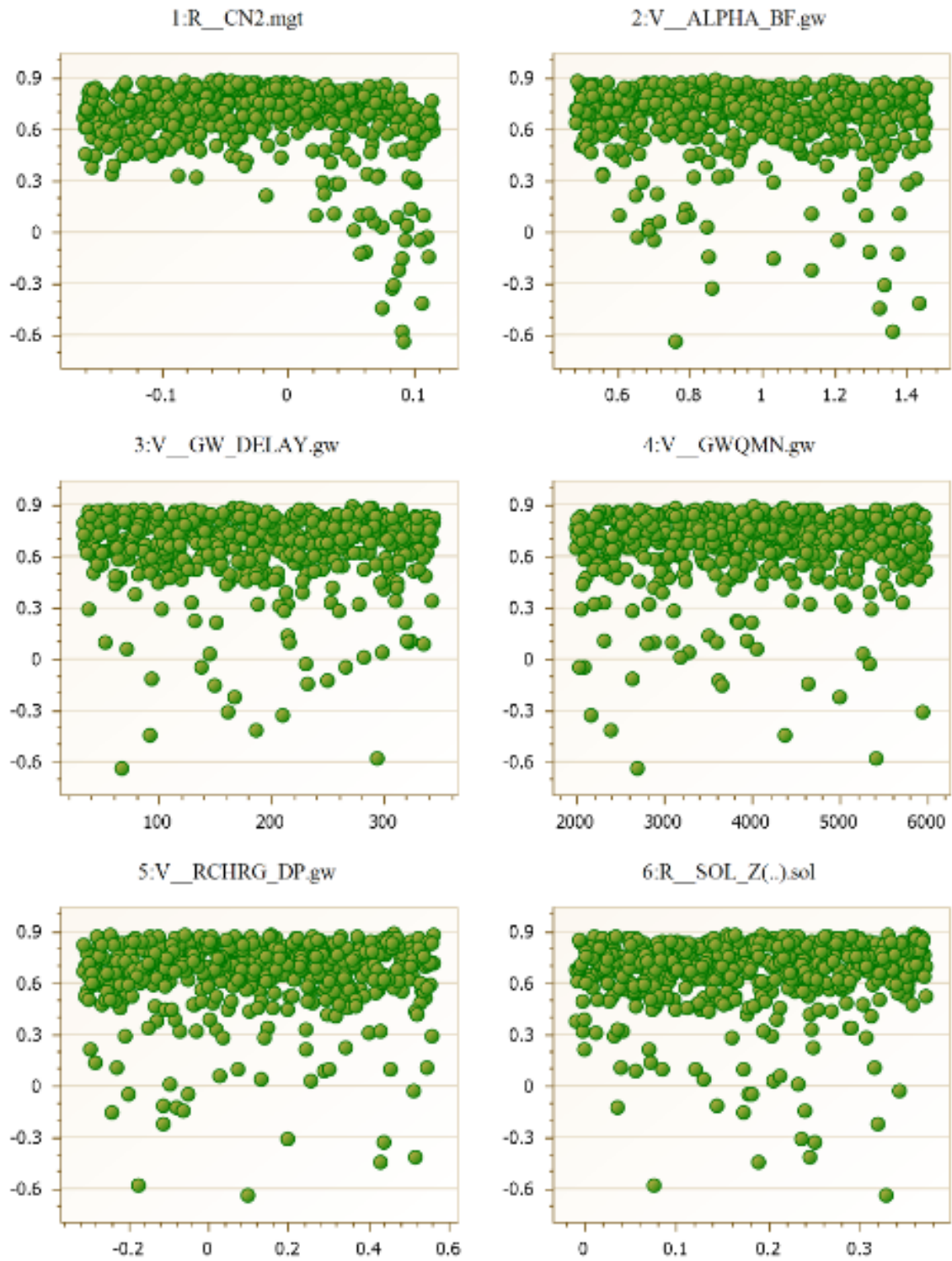
WADA, Y. et al. Modeling global water use for the 21st century: The water futures and solutions (wfas) initiative and its approaches. **Geoscientific Model Development**, Copernicus GmbH, v. 9, n. 1, p. 175–222, 2016.

WINCHELL, M. et al. Arcswat interface for swat 2005. **UsersGuide, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple**, 2007.

ZANETTI, S. S. et al. Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica parte i: Aprimoramento do modelo hidrobacia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 13, p. 429–434, 2009.

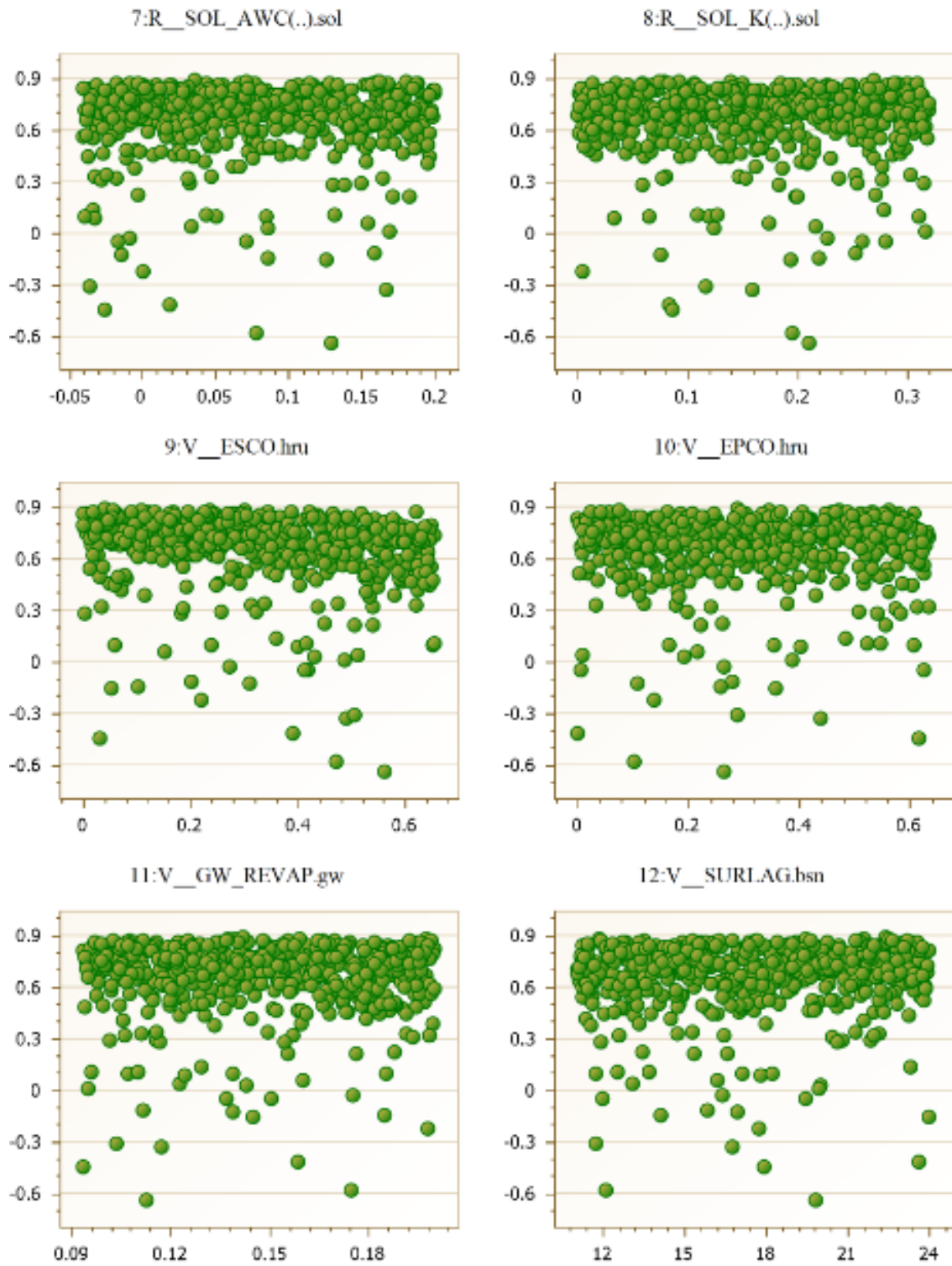
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS USADOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO

Figura 18 – Sensibilidade dos parâmetros 1



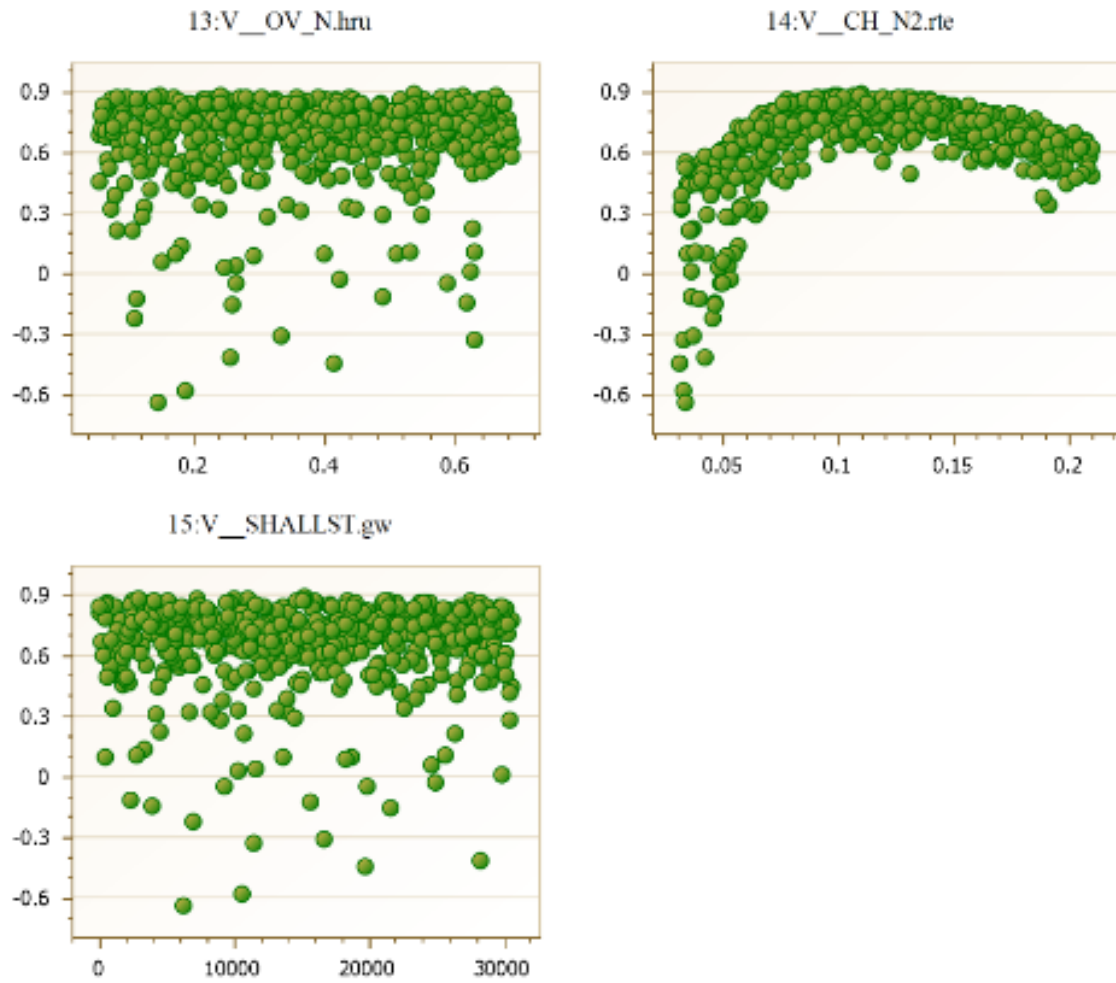
Fonte: (ABBASPOUR, 2013) Adaptado pelo autor

Figura 19 – Sensibilidade dos parâmetros 2



Fonte: (ABBASPOUR, 2013) Adaptado pelo autor

Figura 20 – Sensibilidade dos parâmetros 3



Fonte: (ABBASPOUR, 2013) Adaptado pelo autor