

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Tese

**Impactos Hidrológicos Decorrentes de Projeções Climáticas na Bacia
Hidrográfica do Rio Camaquã (RS)**

Bruna Moreira Sell

Pelotas, 2025

Bruna Moreira Sell

**Impactos Hidrológicos Decorrentes de Projeções Climáticas na Bacia
Hidrográfica do Rio Camaquã (RS)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Recursos Hídricos.

Orientador: Samuel Beskow
Coorientadora: Danielle de Almeida Bressiani

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

S467i Sell, Bruna Moreira

Impactos hidrológicos decorrentes de projeções climáticas na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (RS) [recurso eletrônico] / Bruna Moreira Sell ; Samuel Beskow, orientador ; Danielle de Almeida Bressiani, coorientadora. — Pelotas, 2025.

100 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Simulação hidrológica. 2. SWAT+. 3. Eventos extremos. 4. Modelagem regional. I. Beskow, Samuel, orient. II. Bressiani, Danielle de Almeida, coorient. III. Título.

CDD 627

Elaborada por Simone Godinho Maisonave CRB: 10/1733

Bruna Moreira Sell

Impactos Hidrológicos Decorrentes de Projeções Climáticas na Bacia Hidrográfica do
Rio Camaquã (RS)

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 28 de Fevereiro de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras

Profa. Dr. Danielle de Almeida Bressiani (Coorientadora)
Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo

Profa. Dr. Samanta Tolentino Ceconello
Doutora em Ciências com ênfase em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Matheus Fonseca Durães
Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Douglas da Silva Lindemann
Doutor em Meteorologia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa

Dedico este trabalho a minha família.

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por ter me guiado até este momento e me dado forças nos momentos difíceis.

Aos meus orientadores, Dr. Samuel Beskow e Dr^a. Danielle Bressiani, pesquisadores exímios, expresso minha profunda gratidão não apenas pela orientação técnica, mas também pela paciência, confiança e amizade que construímos ao longo dos anos. Suas contribuições foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu esposo, pelo incentivo, apoio e amor. Agradeço por compreender minhas ausências e por ser meu companheiro inabalável durante toda essa jornada.

À minha mãe, pelo exemplo de força e pelo amor incondicional, que sempre me inspiraram a seguir em frente.

Aos meus irmãos, pela amizade, apoio e torcida constante.

Aos amigos que cruzaram meu caminho durante este período, tornando os desafios mais leves e os momentos felizes ainda mais especiais.

À Universidade Federal de Pelotas, por proporcionar um ensino de qualidade e por ter sido essencial para o meu desenvolvimento científico desde a graduação, despertando em mim o desejo de aprender mais e retribuir à sociedade.

À CAPES/FAPERGS, pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa durante parte da pesquisa, viabilizando este trabalho.

É o brilho nos olhos que ilumina o caminho.
(Autor desconhecido)

Resumo

SELL, Bruna Moreira. **Impactos Hidrológicos Decorrentes de Projeções Climáticas na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (RS)**. 2025. 96f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

Os modelos hidrológicos desempenham um papel fundamental na compreensão dos processos hidrológicos e na simulação das respostas de bacias hidrográficas frente a diferentes cenários climáticos. Entre esses modelos, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) destaca-se por sua abordagem semi-distribuída e sua capacidade de integrar dados gerados por modelos climáticos globais e regionais. Em sua versão aprimorada, o SWAT+ apresenta novos recursos e maior flexibilidade na modelagem hidrológica. No entanto, ainda carece de ferramentas específicas para a predição de eventos hidrológicos extremos, cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas. Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a capacidade do modelo SWAT+ na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC) e na projeção de cenários climáticos futuros, a fim de identificar padrões de variabilidade hídrica e períodos críticos para a gestão dos recursos hídricos. A metodologia adotada baseou-se na calibração e validação do modelo, na definição de cenários climáticos extremos e na simulação das respostas hidrológicas da bacia às projeções climáticas mais recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). O modelo hidrológico SWAT+ foi forçado com dados meteorológicos diários do clima passado (1961 a 2005) e de projeções futuras (2006 a 2099) sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para os modelos BESM, CANES e MIROC. A bacia tem importante relevância para a economia e desenvolvimento regional, além de ser marcada por múltiplos usos d'água e de intensos conflitos. Os resultados indicam que o SWAT+ apresentou um desempenho satisfatório na modelagem hidrológica da BHRC (NSE = 0,79), sendo capaz de representar adequadamente a dinâmica hídrica da bacia. As simulações futuras apontam para um aumento nas vazões médias anuais até meados do século XXI, seguido por uma possível redução sob o cenário RCP 8.5 nas últimas décadas do período analisado. Este estudo fornece subsídios técnicos e científicos para estratégias de adaptação e planejamento da gestão hídrica no bioma Pampa essenciais para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável da água, permitindo a antecipação de períodos críticos e a mitigação dos impactos de eventos extremos, como secas e inundações.

Palavras-chave: simulação hidrológica; projeções climáticas; eventos extremos; modelagem regional.

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico. Fonte: Beskow <i>et al.</i> (2015).....	17
Figura 2 - Classificação simplificada dos modelos hidrológicos. Fonte: Autora.....	19
Figura 3 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã e estações de interesse no rio Grande do Sul e no Bioma Pampa.....	27
Figura 4 – Estrutura da base de dados de entrada necessários ao SWAT+. Fonte: Autora	29
Figura 5 - Mapa hipsométrico da BHRC. Fonte dos dados: SRTM, 2020.	31
Figura 6 - Mapa de solos da BHRC. Fonte: Autora	32
Figura 7 - Mapa de uso e cobertura do solo da BHRC. Fonte: Autora	33
Figura 8 – Calibração BHRC - PM, no passo de tempo a) mensal e b) diário.	43
Figura 9 – Diagrama de dispersão da etapa de calibração - vazões observadas e simuladas no passo de tempo: a) mensal e b) diário.	44
Figura 10 -Vazões médias (a), mínimas (b) e máximas (c) observadas para a bacia hidrográfica do Rio Camaquã – Estação Passo do Mendonça, assim como as estimadas com o SWAT+.....	45
Figura 11 - Validação BHRC - PM, no passo de tempo mensal.....	46
Figura 12 - Curva de permanência de vazão média mensal observada e simulada para a BHRC	47
Figura 13 - Vazões médias mensais extraídas da simulação do modelo SWAT+ forçado pelos dados do clima passado, entre 1987-2005, para os modelos climáticos e os registros observados na BHRC-PM	70
Figura 14 – Distribuição mensal das precipitações médias projetadas pelos modelos climáticos, entre os anos de 2006 e 2099, e precipitação média mensal observada, dos anos de 2006 e 2020.....	71
Figura 15 – Projeção de precipitação do conjunto de modelos climáticos, para os cenários RPC 4.5 e RCP 8.5, entre os anos de 2006-2099	73
Figura 16 - Simulação das vazões médias mensais frente aos dados de clima futuro (2006-2099) projetados para os MCGs: a) BESM; b) CANES; c) MIROC.....	74
Figura 17 - Distribuição mensal das vazões médias projetadas pelos modelos climáticos, entre os anos de 2006 e 2099, e vazão média mensal simulada na calibração do modelo hidrológico, entre os anos de 2006 e 2020 para a) RCP 4.5, b) RCP 8.5.....	76
Figura 18 – Curva de permanência de vazões médias mensais observadas e simuladas pelo modelo hidrológico SWAT+ forçado pelos modelos climáticos para os cenários: a) RCP 4.5; b) RCP 8.5	77
Figura 19 - Projeção de vazão média anual do conjunto de modelos climáticos, para os cenários RPC 4.5 e RCP 8.5, entre os anos de 2006-2099.....	79

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Equiparação dos Usos do Solo da BHRC no SWAT+.....	34
Tabela 2 - Distribuição das HRUs na BHRC-PM	35
Tabela 3 – Modificações Realizadas	38
Tabela 4 - Alteração do Índice de Área Foliar.....	38
Tabela 5 - Parâmetros e intervalos definidos para realizar a análise de sensibilidade	39
Tabela 6 – Critério de avaliação de performance estatística. Fonte: Moriasi <i>et al.</i> (2007).	41
Tabela 7 - Parâmetros e intervalos definidos para realizar a análise de sensibilidade	41
Tabela 8 - Parâmetros calibrados do modelo SWAT com seus valores padrão e calibrados.....	42
Tabela 9 - Vazões de referência da curva de permanência e suas respectivas vazões médias observadas e estimadas para a BHRC	47
Tabela 10 – Características UHRC.....	65
Tabela 11 – Critério de avaliação de performance estatística. Fonte: Moriasi <i>et al.</i> (2007).	67
Tabela 12 – Modelos climáticos empregados neste estudo.....	67
Tabela 13 – Precipitação observada para a BHRC-PM (1987-2005) e de clima passado (1987-2005) pelos modelos climáticos.....	69
Tabela 14 – Precipitação média mensal projetada pelos modelos climáticos	71

Sumário

1	Concepção estrutural da tese	11
2	Introdução	12
3	Objetivos	15
3.1	Geral	15
3.2	Específicos	15
4	Hipóteses	16
5	Revisão de Literatura	17
5.1	Hidrologia e ciclo hidrológico	17
5.2	Modelagem hidrológica	18
6	Artigo 1 – Calibração do modelo SWAT+ de uma bacia hidrográfica importante e representativa do bioma Pampa	23
Resumo	Resumo	23
6.1	Introdução	23
6.2	Material e Métodos	27
6.2.1	Área de estudo	27
6.2.2	Configuração do Modelo SWAT+ para a BHRC	28
6.2.3	Parametrização	37
6.2.4	Análise de sensibilidade	39
6.2.5	Calibração e Validação	40
6.3	Resultados e Discussão	41
6.3.1	Calibração e Validação	41
6.4	Conclusão	50
6.5	Referências	51
7	Artigo 2 – Simulação Hidrológica Futura de uma Bacia Hidrográfica Representativa do Bioma Pampa sob Diferentes Cenários Climáticos	60
Resumo	Resumo	60
7.1	Introdução	60
7.2	Material e Métodos	63
7.2.1	Área de estudo	63
7.2.2	Modelagem Hidrológica	65
7.3	Resultados e Discussão	69
7.4	Conclusão	80
7.5	Referências	81
8	Considerações Finais	86
Referências	Referências	88

1 Conceção estrutural da tese

Esta tese seguiu a estrutura em formato de artigos, a qual engloba dois artigos na versão consolidada. O primeiro artigo, apresentado no capítulo 6 deste documento, faz menção ao processo de construção da modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT+. Neste tópico, é revelada a problemática essencial da realidade da bacia hidrográfica do rio Camaquã, área de estudo, e onde a modelagem hidrológica é apresentada como uma ferramenta de tomada de decisão. O artigo compreende a construção da base de dados de entrada do modelo hidrológico com informações obtidas a partir de fontes públicas, abrange a consistência e tratamento de dados, passa pela parametrização do modelo com aproximações obtidas a partir de uma ampla revisão bibliográfica, realiza as etapas de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo e inclui a avaliação e compreensão dos processos hidrológicos simulados, por meio da análise dos resultados quanto a performance estatística do balanço hídrico simulado.

Na sequência, com o modelo devidamente calibrado e validado, o segundo artigo vislumbra realizar a modelagem hidrológica com informações climáticas referentes as projeções futuras, com base dados e mapas foram extraídos no Portal de Mudanças Climáticas no Brasil do INPE/MCTI (2021). Foram avaliadas as projeções de variação do clima para o horizonte entre os anos de 2006 e 2099, para os modelos climáticos BESM, CANES e MIROC. Além disso, foram considerados dois cenários, um mais brando que indica a estabilização média de gases do efeito estufa (RCP4.5) e o outro mais severo, que indica altas emissões (RCP8.5). O objetivo principal deste artigo foi identificar as respostas da bacia hidrográfica do Rio Camaquã para as condições climáticas futuras projetadas e assim antever medidas para mitigar os possíveis impactos de eventos extremos na área.

O intuito desta tese é revelar a aplicabilidade do modelo SWAT+ a realidade de bacias hidrográficas brasileiras, especialmente de uma bacia de grande porte e representativa do bioma pampa como um instrumento de análise e apoio as estratégias de gestão dos recursos hídricos.

2 Introdução

Os desastres ambientais recorrentes enaltecem os desafios relacionados à gestão dos recursos hídricos e de riscos de desastres. As projeções climáticas indicam o agravamento na intensificação de eventos extremos, logo, episódios como secas e inundações podem ser mais frequentes, a depender das interações na bacia. Assim, a eficiente gestão estratégica e integrada dos recursos hídricos, buscando atender as diretrizes e aos objetivos expostos na Lei nº 9.433/97, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), deve ser fundamentada em conhecimento científico.

Situada na região sul do Brasil, a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC) possui área de drenagem de aproximadamente 21.657 km², englobando de forma total ou parcial 28 municípios gaúchos. A região está inserida no Bioma Pampa, um ecossistema de grande relevância ambiental, caracterizado por campos nativos que abrigam uma rica biodiversidade e desempenham papel essencial na regulação do clima e no ciclo hidrológico. Este bioma é fundamental para a conservação dos recursos naturais, fornecendo serviços ecossistêmicos essenciais como a manutenção da qualidade da água, a retenção de carbono e o suporte à pecuária extensiva, atividade econômica tradicional da região.

Na BHRC são registrados uma grande variedade de usos consuntivos e não consuntivos, o que denota a grande importância da bacia na região sul do país, em termos econômico, social e ambiental. A alta relevância da bacia para a região culminou na elaboração do plano de bacia. O estudo foi desenvolvido em 2015 e contou com uma minuciosa investigação que apresentou o panorama da bacia hidrográfica e da sociedade que nela vive, abordando os usos observados, aspectos relacionados ao controle e preservação das águas, além de análises multidisciplinares que identificaram conflitos nos ambientes naturais e relação com a atuação antrópica. Também foram evidenciadas as potencialidades e restrições relacionadas as projeções futuras de demanda hídrica, na etapa de prognósticos.

No Diagnóstico da Bacia (GAMA, 2015) são apresentados os eventos de emergência/calamidade pública, relacionados à disponibilidade de água, registrados pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil para os municípios da bacia do Camaquã entre o período de 1970 a 2015. O levantamento constatou que a bacia sofre com episódios de eventos extremos recorrentes, os quais se dividem quase que

igualmente entre eventos de déficit (estiagem e seca) e superávit hídrico (inundações, enxurradas e alagamentos).

Em virtude dos recorrentes eventos climáticos extremos observados na área de estudo, é imprescindível que se conheça a resposta hidrológica da bacia hidrográfica perante a ocorrência de diferentes cenários. Neste sentido, surgem os modelos hidrológicos como uma ferramenta valiosa que possibilitam compreender e representar o comportamento dos processos hidrológicos na escala de bacia.

Dentre os modelos hidrológicos disponíveis, Ferreira (2017) indica que o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) se destaca devido sua capacidade de simular os processos hidrológicos temporalmente e de forma semi-distribuída no espaço, pois sua estrutura funcional permite boa integração com interfaces gráficas, além de permitir acoplar dados gerados por modelos climáticos, a nível global e regional. O SWAT é classificado como um modelo chuva-vazão, determinístico, semi-distribuído e semi-conceitual. O fato de seus parâmetros serem distribuídos, possibilita a simulação de longos períodos em bacias complexas, com diferentes usos do solo, topografia e condições climáticas, a partir da discretização da bacia em sub-bacias e em unidades de resposta hidrológica (URH); o que torna o SWAT capaz de avaliar e prever os impactos do clima, dos solos e do uso e manejo da terra nas mais diversas aplicações, tais como: no abastecimento de água, no controle da poluição, na erosão do solo, produção agrícola, dentre outros.

Devido as suas características agroecológicas o modelo hidrológico SWAT tem uma gama de usuários em diversas partes do mundo, onde têm obtido resultados satisfatórios. Da mesma forma, limitações e pontos a serem aperfeiçoados foram naturalmente sendo revelados ao longo do tempo pela comunidade científica e culminaram no desenvolvimento de uma nova versão, o SWAT+.

O SWAT+ é uma versão modificada do SWAT, completamente reestruturada, no que tange à estrutura e organização dos arquivos de entrada e que traz como principal incremento a discretização em unidades de paisagem (Landscape Units – LSUs). O SWAT+ é muito mais flexível em termos de representação espacial e das interações entre os processos que ocorrem dentro da bacia.

Embora muitos recursos do SWAT já tenham sido aprimorados no SWAT+ e novas funcionalidades tenham sido adicionadas, até o momento, o modelo não conta com uma ferramenta específica para a predição de eventos críticos extremos, cada

vez mais recorrentes. Desta forma, aliar à modelagem hidrológica a modelagem climática, evidentemente permitirá sua mais ampla utilização, tanto no meio científico quanto profissional, pois auxiliará na gestão de recursos hídricos e de riscos de desastres ambientais no Brasil e no mundo.

Além disso, o conhecimento sobre as projeções climáticas futuras, em particular os extremos climáticos, permitirá avaliar os impactos esperados e subsidiar os tomadores de decisão a formular políticas efetivas buscando estratégias oportunas de adaptação e/ou mitigação. Para alcançar tais objetivos, esta pesquisa utilizará uma ferramenta inovadora, o SWAT+ Toolbox, software gratuito que permite realizar a análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT+ e que pelo seu ineditismo requer aplicações em condições de características singulares, tal como o bioma Pampa.

3 Objetivos

3.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT+ como ferramenta metodológica para a simulação de eventos extremos na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã, considerando diferentes modelos climáticos globais e sua capacidade de estimar cenários futuros extremos, de secas e cheias.

3.2 Específicos

- Calibrar e validar o modelo hidrológico SWAT+, visando a representação dos processos hidrológicos da bacia hidrográfica selecionada;
- Levantar as projeções climáticas extremas para a área de estudo;
- Simular a resposta hidrológica da bacia de estudo, com o modelo hidrológico (SWAT+), a partir de projeções dos cenários climáticos;
- Identificar períodos críticos para gestão hídrica com base nos cenários climáticos projetados.

4 Hipóteses

A modelagem hidrológica, quando integrada à simulação de projeções climáticas sob diferentes cenários, pode fornecer estimativas regionais que permite examinar as variações temporais dos impactos sobre a disponibilidade hídrica futura em bacias hidrográficas críticas, revelando os efeitos dos eventos extremos de seca e cheias, e orientando políticas de gestão sustentável dos recursos hídricos.

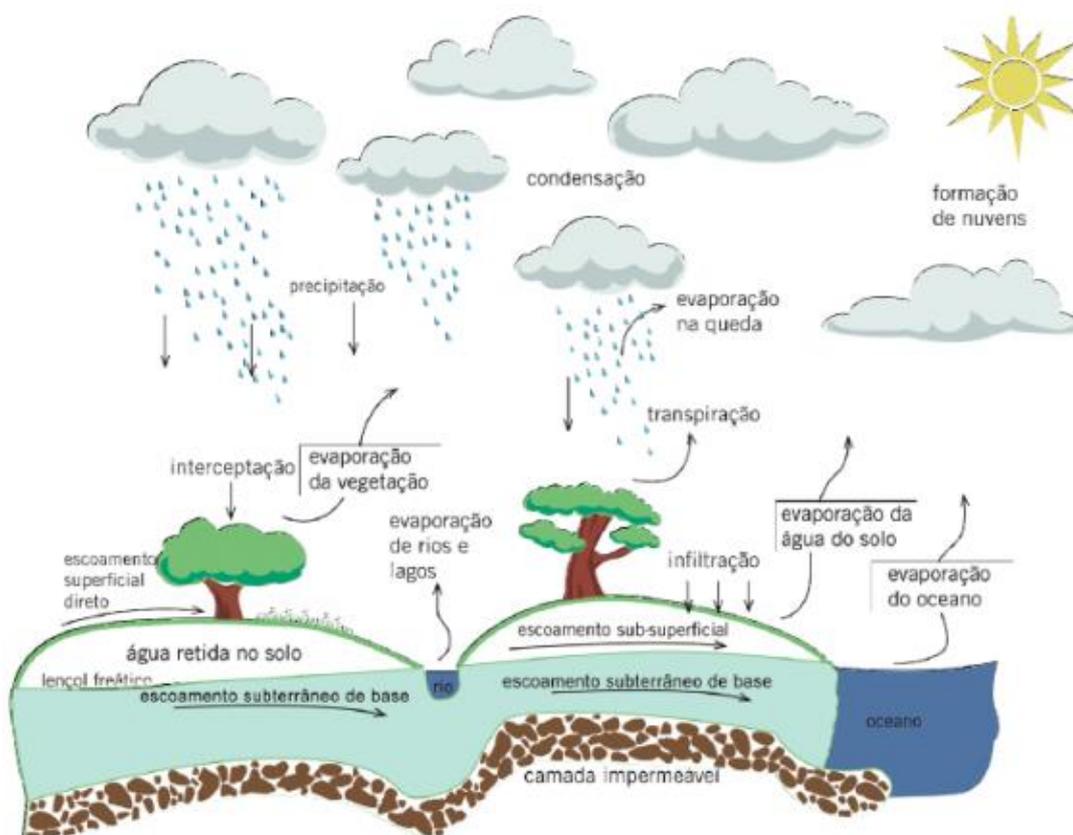
5 Revisão de Literatura

5.1 Hidrologia e ciclo hidrológico

Collischonn e Dornelles (2015) definem hidrologia como sendo a ciência que estuda a água na Terra. Os autores apontam que a engenharia hidrológica é a aplicação destes conhecimentos para resolver problemas relacionados aos usos da água, tais como: escassez, drenagem urbana, controle de cheias e inundações, geração de energia, barramentos e irrigação.

O ciclo hidrológico, ilustrado na Figura 1, corresponde à dinâmica da água no meio ambiente, compreendendo seus diferentes estados físicos que se verifica nos diferentes ambientes do globo terrestre (Mello; Silva; Beskow, 2020). Devido às complexidades envolvidas no estudo dos componentes do ciclo hidrológico em escala global, as estratégias de planos de gestão e gerenciamento dos recursos hídricos são formuladas a partir da delimitação de uma região de estudo em escala local; onde, para tanto, a Lei 9.433/1997 estabelece a bacia hidrográfica como unidade de gestão territorial.

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico. Fonte: Beskow *et al.* (2015)



Mello, Silva e Beskow (2020) definem a bacia hidrográfica como uma área delimitada por divisores topográficos, interligada pela rede de drenagem e na qual toda captação de água conflui para uma mesma saída, o exutório. Em síntese, Tucci (2009) considera que a bacia hidrográfica tem como papel hidrológico transformar a entrada de água (volume total precipitado) em uma saída (volume de água escoado pelo exutório).

Segundo Rennó e Soares (2003), um modelo, considerado uma representação simplificada da realidade, pode auxiliar no entendimento dos processos que a envolvem. É oportuno esclarecer que o processo de utilização de um modelo é denominado como simulação (Caldeira, 2016).

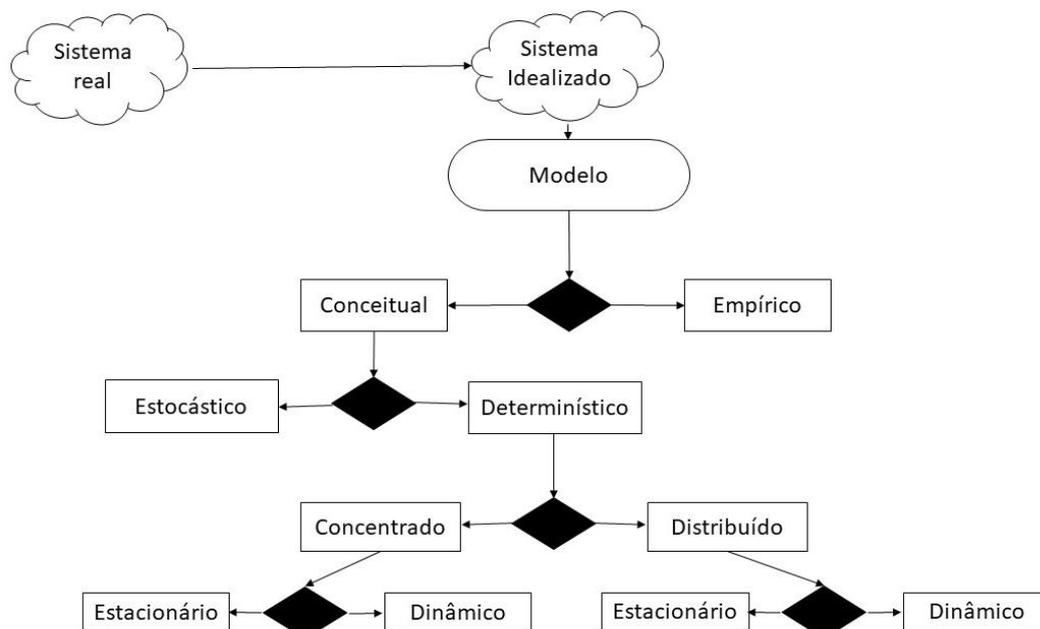
5.2 Modelagem hidrológica

De acordo com Viola *et al.* (2009), uma das formas mais comuns de avaliar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas é por meio do desenvolvimento e aplicação de modelos fisicamente baseados.

Carvalho (2009) aponta que os modelos hidrológicos, uma vez alimentados com dados básicos da bacia hidrográfica ou região de interesse, podem fornecer uma série de informações e estimativas sobre as variáveis hidrológicas do local, tais como a vazão dos rios, a evapotranspiração, dados diversos sobre qualidade de água e água subterrânea, além da produção, transporte e deposição de sedimentos.

A Figura a seguir exemplifica os níveis de caracterização empregados na classificação dos modelos hidrológicos. Para maiores detalhamentos, recomenda-se a leitura complementar de Caldeira *et al.* (2018), da qual apresenta uma minuciosa caracterização dos tipos de classificação dos modelos hidrológicos.

Figura 2 - Classificação simplificada dos modelos hidrológicos. Fonte: Autora



Alguns dos modelos de transformação chuva-vazão bastante usados mundialmente e no Brasil incluem:

- SAC-SMA - Também conhecido como Sacramento, o modelo foi idealizado em 1995 para a previsão de cheias no rio Sacramento (Califórnia). É um modelo de parâmetros distribuídos e baseia-se no balanço hídrico. Esse modelo é amplamente utilizado pelo Serviço Meteorológico Nacional dos Estados Unidos (Moser, Kroczynek, Hlywiak, 2013; NOAA, 2021) e em diversos outros países, onde tem obtido a estimativa de vazões de modo eficaz (Sousa Júnior *et al.*, 2017; Uliana *et al.*, 2019).
- TOP-MODEL – modelo semi-distribuído, proposto inicialmente por Beven e Kirkby em 1979. Se destaca pela abordagem simples, que utiliza a topografia da bacia, o índice topográfico, para estimar o escoamento superficial e o escoamento subsuperficial, por similaridade hidrológica.
- LISEM – o modelo *Limborg Soil Erosion Model* (De Roo *et al.*, 1996) é um modelo idealizado para analisar eventos isolados chuva-vazão, utilizando equações fisicamente baseadas de modo a descrever componentes específicos do ciclo hidrológico.
- MGB-IPH – O Modelo de Grandes Bacias (Tucci, 2005), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas, foi desenvolvido para aplicações em bacias hidrográficas maiores que 10.000 km². Devido a sua natureza distribuída, a

bacia é dividida em unidades geomorfologicamente definidas chamadas mini bacias, e cada mini bacia é caracterizada pela vegetação e uso do solo usando a abordagem de Unidade de Resposta Hidrológica (URH). A simulação visa a representação do balanço hídrico e conta com uma extensa lista de publicações que remetem a suas variadas aplicações (HGE, 2023).

- LASH: Modelo semi-conceitual que simula as lâminas de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo em cada mini bacia e propaga as vazões na rede de drenagem através de um modelo vazão-vazão (Beskow *et al.*, 2011; Caldeira *et al.*, 2019; Vargas *et al.*, 2023).
- SMAP – O *Soil Moisture Accounting Procedure*, é um modelo conceitual de simulação hidrológica, do tipo transformação chuva-vazão, que foi desenvolvido por Lopes, Braga e Conejo, em 1981. O modelo é utilizado no Brasil pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para complementar períodos de séries de vazões de aproveitamentos hidrelétricos e realizar a previsão de vazão (ONS, 2018).
- SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*, um modelo eco-hidrológico que engloba diferentes componentes hidrológicos e agronômicos, e, por isso, é usado por muitas agências governamentais e instituições para apoiar a tomada de decisão sobre recursos hídricos (Bressiani *et al.*, 2015).

Uma vez definido o modelo, desenvolvem-se as etapas de análise de sensibilidade, calibração, validação e predição (Caldeira, 2016).

No desenvolvimento desta tese o modelo SWAT+ classificado como um modelo chuva-vazão, determinístico, semi-distribuído e semi-conceitual será utilizado e é apresentado na sequência.

O *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT ou na tradução literal “Ferramenta de Avaliação de Solo e Água” é um modelo de domínio público desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (Agricultural Research Service USDA - ARS) em conjunto com Texas A&M University (SWAT, 2020). Um sofisticado modelo em escala de bacia que contribui para a compreensão do ecossistema complexo e a prever impactos do clima, solos, uso e manejo da terra, no abastecimento de água e no controle da poluição, bem como erosão do solo, fertilidade e produção agrícola (Scopel, 2012).

A primeira versão do SWAT foi desenvolvida no início de 1990 (Arnold *et al.*, 2012). Com o passar dos anos, o desenvolvimento científico em busca de formas mais

eficientes para modelar as questões ambientais impulsionou o aperfeiçoamento do SWAT. Segundo Bieger *et al.* (2017) o SWAT+ é uma resposta a estas pressões, que atende as limitações identificadas pela comunidade científica.

Bressiani *et al.* (2015) apontam que o SWAT é um modelo eco-hidrológico que engloba diferentes componentes hidrológicos e agrônômicos, e, por isso, é usado por muitas agências governamentais e instituições privadas para apoiar a tomada de decisão sobre recursos hídricos, bem como por universidades e outras instituições envolvidas em pesquisas de ponta. Arnold *et al.* (2012) destacam que o modelo é projetado para simular longos períodos e é capaz de avaliar os efeitos das variações de manejo.

Além do modelo em si, há uma série de ferramentas destinadas a preparar as entradas de conjuntos de dados espaciais GIS (ArcSWAT e QSWAT), realizar análises de sensibilidade, calibração e incerteza (SWAT-CUP), assim como para a visualização dos resultados (VizSWAT). Essas ferramentas estão disponíveis para download no site do SWAT (SWAT, 2020).

O SWAT+, a versão modificada, reúne uma série de melhorias tanto na estrutura do modelo que faz a separação das unidades de paisagem (LSUs) quanto na interface gráfica. O SWAT+ tem integração com o QGIS, software livre de fonte aberta, onde se realiza a configuração física da bacia e com o SWAT+ Editor, interface que permite configurar as informações de entrada do modelo e de contorno da modelagem. Para a análise de sensibilidade e calibração do SWAT+ há disponível de modo gratuito o RSWAT e o SWAT+Toolbox.

O uso mundial do SWAT é crescente, com muitas aplicações em pesquisas científicas e por agências governamentais, para avaliar mudanças climáticas, efeitos do uso do solo sobre os recursos hídricos e avaliação da capacidade do modelo para futuras aplicações (Gassman *et al.*, 2007).

No âmbito nacional, a maioria dos estudos se detiveram em verificar a viabilidade da aplicação do modelo SWAT em bacias hidrográficas específicas, sendo a maioria em bacias hidrográficas experimentais com área de drenagem inferior a 1000 km² (Brandão, 2024; Dotto, 2024; Farias *et al.*, 2023). Dentre estes estudos, observa-se a simulação de alteração de cenários, predição de vazões, transporte de sedimentos, de nutrientes, na estimativa de evapotranspiração, na qualidade d'água, além de trabalhos teóricos de revisão (Bressiani *et al.*, 2015).

A revisão apresentada por Bressiani *et al.* (2015) ressalta também que o SWAT é comprovadamente uma robusta ferramenta de pesquisa e investigação para os mais diversos tipos de aplicações hidrológicas. Os autores vislumbram que a adoção confiável do modelo SWAT no Brasil, deve passar por um processo de difundi-lo, incluindo, portanto, uma série de novas pesquisas, testes e também a necessidade de desenvolvimentos para melhorar a aplicação do modelo, para assim fornecer orientação e suporte aos órgãos competentes. Dentre as principais lacunas a serem exploradas os autores identificaram que a avaliação de risco e gerenciamento de desastres para secas, inundações e deslizamentos de terra representam os principais impactos de eventos extremos no Brasil. Sugerem, portanto, a aplicação da modelagem hidrológica através do SWAT em áreas críticas combinada com a avaliação de riscos, para o eficiente planejamento de medidas e adaptações para a predição de inundação e secas.

6 Artigo 1 – Calibração do modelo SWAT+ de uma bacia hidrográfica importante e representativa do bioma Pampa

Resumo

A crescente preocupação com a gestão hídrica e a mitigação de desastres ambientais destaca a necessidade de modelos hidrológicos eficazes para apoiar a tomada de decisões. Este estudo teve como objetivo calibrar e validar o modelo SWAT+ na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC), uma região representativa do bioma Pampa, avaliando sua capacidade de simular o balanço hídrico. A metodologia incluiu a construção da base de dados espaço-temporal, parametrização do modelo, análise de sensibilidade e calibração/validação com dados observados. Os resultados demonstraram uma boa aderência do modelo às condições hidrológicas da bacia, com coeficientes NSE de 0,79 e 0,80 para calibração e validação, respectivamente. Além disso, a modelagem mostrou-se eficiente na representação dos processos hidrológicos da região, permitindo estimativas confiáveis de vazão e balanço hídrico. Conclui-se que o SWAT+ é uma ferramenta robusta para o planejamento e a gestão hídrica da BHRC, possibilitando futuras aplicações voltadas à segurança hídrica e ao planejamento territorial.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; calibração; balanço hídrico, gestão hídrica.

Abstract

Growing concerns about water management and disaster mitigation highlight the need for effective hydrological models to support decision-making. This study aims to calibrate and validate the SWAT+ model in the Camaquã River Watershed (BHRC), a representative region of the Pampa biome, evaluating its ability to simulate the water balance. The methodology included the construction of a spatiotemporal input database, model parameterization, sensitivity analysis, and calibration/validation using observed data. The results demonstrated a good adherence of the model to the watershed's hydrological conditions, with NSE coefficients of 0.79 and 0.80 for calibration and validation, respectively. Furthermore, the modeling effectively represented the region's hydrological processes, providing reliable estimates of flow and water balance. It is concluded that SWAT+ is a robust tool for water resource planning and management in the BHRC, enabling future applications focused on water security and territorial planning.

Keywords: hydrological modeling; calibration; water balance; water management.

6.1 Introdução

Os desastres ambientais provocam enormes perdas econômicas e sociais ao redor do mundo. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, a alta densidade demográfica aliada a má ocupação do uso da terra, em especial nas áreas urbanas, agrava a propensão a desastres ambientais (PBMC, 2016). A expansão desordenada evidencia a vulnerabilidade social e ambiental, bem como os desafios relacionados à gestão dos recursos hídricos e de prevenção de desastres (Farias; Mendonça, 2022). Esses desafios abrangem desde a garantia da segurança alimentar até a segurança

hídrica e energética, tornando urgente a implementação de ações preventivas para mitigar os impactos diretos e indiretos que se estendem a aplicações de curto, médio e longo prazo.

O bioma Pampa abriga um dos ecossistemas mais ricos em espécies do mundo e fornecem uma ampla gama de serviços ecossistêmicos, visto que as pastagens desempenham um papel importante no ciclo global do carbono (Trentin; Laurent; De Souza, 2023). Nesse contexto, a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC) localizada no bioma Pampa gaúcho exemplifica como as questões de gestão de recursos hídricos e prevenção de desastres se manifestam em um território estratégico. Caracterizada por usos consuntivos, como irrigação superfície, dessedentação animal, abastecimento público e industrial, e usos não consuntivos, como aquicultura, piscicultura, geração de energia, recreação, turismo e navegação, a BHRC desempenha um papel crucial para a região sul do Brasil. A elaboração de seu Plano de Recursos Hídricos (GAMA, 2015) revelou desafios significativos relacionados à compatibilização entre disponibilidades e demandas, tanto em quantidade quanto em qualidade. Entre esses, destacam-se os eventos de cheias, que afetam ocupantes de áreas suscetíveis à inundação, evidenciando a necessidade de políticas públicas integradas para minimizar os impactos e promover o desenvolvimento sustentável na região.

A fim de orientar as melhores práticas e assim obter soluções que atendam satisfatoriamente as demandas de uma certa região, torna-se essencial a condução de uma investigação científica. Entretanto, a análise ambiental das variáveis de influência nos processos hidrológicos envolve medições no sistema real, o que torna esta tarefa árdua e até mesmo impossível em determinadas condições, dado o longo prazo de monitoramento exigido e os altos custos requeridos (Santos; Oliveiras; Mauad, 2020). Além disso, Beskow, Norton e Mello (2013) salientam que a carência de disponibilidade de dados, tanto temporais quanto espaciais, especialmente em bacias de pequeno e médio porte, acentuam ainda mais os entraves relacionados com a constituição de séries históricas dos postos de monitoramento existentes, os quais podem incluir longos períodos de falhas e/ou inconsistências nos dados.

Diante da escassez de dados monitorados, é comum que hidrólogos utilizem modelos hidrológicos chuva-vazão para simular vazões ou prever cenários em áreas sem medições (Beven, 2001; Hao *et al.*, 2015). Nesse contexto, Caldeira *et al.* (2018)

reforçam que a modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial e moderna para a gestão de recursos hídricos e dimensionamentos hidrológicos.

Esses modelos permitem compreender os processos hidrológicos em bacias hidrográficas e simular respostas a diferentes cenários (Gull; Shah, 2020). Inicialmente voltados para ampliar séries hidrológicas (Tucci, 2005), os modelos atualmente visam atender demandas sociais, fornecendo subsídios para o planejamento e a tomada de decisões por gestores (Bressiani *et al.*, 2015a).

Modelos como SAC-SMA, TOP-MODEL, LISEM, MGB-IPH, LASH, SMAP e SWAT são amplamente utilizados no Brasil para transformação chuva-vazão, cada um com características específicas que os tornam adequados para diferentes situações e bacias.

Merrit, Letcher e Jakeman (2003) destacam a importância de selecionar o modelo mais adequado, considerando que, por serem representações simplificadas de processos naturais, os modelos hidrológicos possuem incertezas inerentes (Bajracharya *et al.*, 2020; Garna *et al.*, 2023; Moges *et al.*, 2020; Orth *et al.*, 2015; Wagena *et al.*, 2019). Além disso, a qualidade dos dados de entrada e a estimativa precisa dos parâmetros requeridos representam desafios significativos (Gupta e Govindaraju, 2019; Tegegne *et al.*, 2019), que impactam diretamente os resultados simulados (Arnold *et al.*, 2012; Bressiani *et al.*, 2015a). Zhan *et al.* (2013) reforçam que a maioria dos modelos hidrológicos são altamente complexos e compostos por parâmetros que muitas vezes não são diretamente mensuráveis, o que pode limitar sua compreensão e aplicação prática.

Dentre os modelos disponíveis, o *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT (Arnold *et al.* 1998) se destaca por ter uma gama de usuários, incluindo agências governamentais, universidades e instituições envolvidas com pesquisas de ponta em diversas partes do mundo (Gassman *et al.*, 2007), onde tem obtido resultados satisfatórios. No Brasil, a aplicação do SWAT vem sendo explorada em bacias de tamanhos variados, regiões geográficas, configurações de ocupação da paisagem, e com objetos de estudo distintos onde têm apresentado resultados também satisfatórios (Bressiani *et al.*, 2015a,b; Campos *et al.* 2024a; Campos *et al.*, 2024b; Dos Santos *et al.*, 2023; Fukunaga *et al.*, 2015; Jovino *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2014; Neto *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2014, Santos *et al.*, 2018). No bioma Pampa é limitada a quantidade de estudos que lançaram mão da modelagem hidrológica com o SWAT,

dentre as abordagens destaca-se o uso em bacias experimentais (Silva, 2020) e de pequeno a médio porte (Steinmetz, 2020; Trentin *et al.*, 2023).

Impulsionado por questões ambientais, o SWAT+ é uma versão aprimorada do modelo SWAT (Arnold *et al.*, 2018), que oferece maior flexibilidade na caracterização da bacia hidrográfica e dos processos hidrológicos, demandando maior responsabilidade dos usuários para alcançar cenários realistas (Bieger *et al.*, 2017). Classificado como um modelo chuva-vazão, determinístico, semi-distribuído e semi-conceitual, o SWAT+ é sofisticado, mas requer uma série de informações específicas para sua aplicação (Goudarzi, Sarraf, Ahmadi, 2021). Nesse contexto, torna-se fundamental restringir a análise aos parâmetros mais influentes, utilizando a análise de sensibilidade como ferramenta para otimizar os resultados (Devak, Dhanya, 2017; Veith *et al.*, 2010).

Na literatura, é extensa a lista de estudos que se valeram da modelagem bem sucedida com o SWAT e que utilizaram o algoritmo de calibração SWAT-CUP (Bressiani, 2016; Olivas Kaji *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023; Siqueira *et al.*, 2021). Contudo, na versão modificada, tal ferramenta não encontra-se disponível para acesso livre. Uma alternativa inovadora é o software SWAT+ Toolbox, uma ferramenta gratuita que permite ao usuário realizar análises de sensibilidade, calibração e validação (Chawanda, 2023). Porém, por ser uma ferramenta nova, Tapas *et al.* (2025) ressaltam que ainda não possui quantidade volumosa de publicações que o utilizem (Ferreira *et al.*, 2024; Harifidy *et al.*, 2024).

Diante deste cenário, o presente estudo visa avaliar a eficácia do modelo SWAT+ na representação do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica representativa do bioma Pampa, por meio do SWAT+ Toolbox.

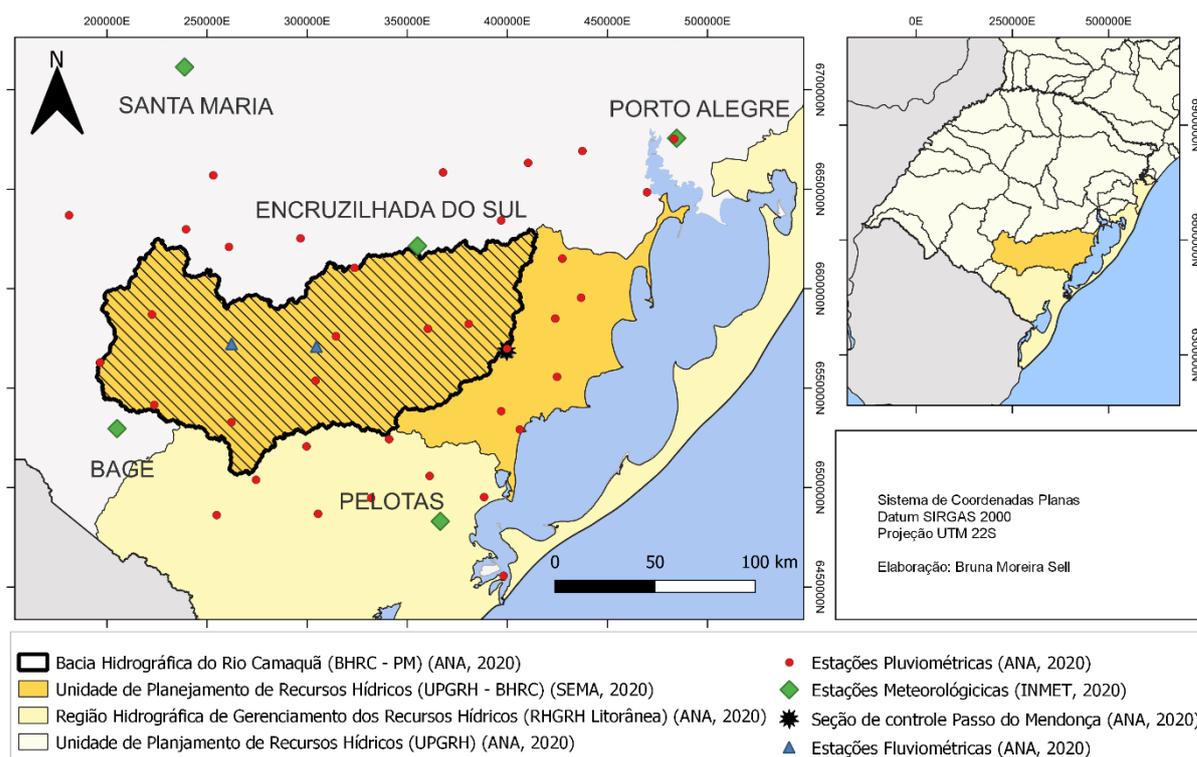
Os principais objetivos deste estudo incluem: 1) construir a base de dados de entrada espaço-temporal para a bacia em estudo, com fontes públicas; 2) parametrizar o modelo; 3) calibrar e validar as simulações; e, 4) avaliar o balanço hídrico. Os resultados deste estudo podem ajudar os formuladores de políticas públicas na tomada de decisões em várias áreas, como gestão dos recursos hídricos, agricultura, planejamento urbano, segurança hídrica, energética e alimentar, dentre outros.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC), área deste estudo, está inserida na Região Hidrográfica do Litorânea (SEMA, 2021), na porção central do Estado do Rio Grande do Sul, na região sul do Brasil, como mostra a Figura 3. A BHRC possui uma área de cerca de 21.657 km². Sua população total estimada é de 356 mil habitantes (GAMA, 2015), dividida em 28 municípios, que estão inseridos de forma total ou parcial na bacia. O rio principal tem extensão de aproximadamente 300 km entre suas nascentes e foz, que desemboca na Laguna dos Patos.

Figura 3 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã e estações de interesse no rio Grande do Sul e no Bioma Pampa.



A Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã, é representativa do bioma pampa, apresentando extensa área de campo natural coberta por gramíneas, as quais mantêm uma rica biodiversidade, além de ser uma fonte de serviços ecossistêmicos valiosos (Trentin, Laurent, De Souza, 2023). A BHRC é caracterizada por topografia irregular e complexa, com heterogeneidade no uso e ocupação do solo e variabilidade

sazonal do regime de precipitação. São observadas altitudes variando de 17 a 553 metros, com declividade média de 6.5%. Já os solos predominantes são do tipo Argissolo e Neossolo, com cobertura massivamente ocupada por campos secos e terras agricultáveis.

Segundo Alvares *et al.* (2013), o enquadramento dado pela classificação climática de Köppen confere à BHRC o predomínio do tipo Cfa, de clima subtropical, com grande variabilidade climática. A região sul é a mais fria do Brasil, onde no inverno são observadas temperaturas mínimas com frequente ocorrência de geada, enquanto o verão é quente. No inverno a temperatura média é de 12,8°C e no verão a temperatura média é de 22,7°C (GAMA, 2016).

Na BHRC são observados diversos usos consuntivos da água, como o abastecimento humano, a dessedentação animal, uso industrial e a irrigação, assim como usos não consuntivos, como a geração de energia hidroelétrica, pesca e navegação. Além dos diferentes usos da água identificados, que denotam a grande importância da bacia na região sul do Brasil, a BHRC sofre com episódios de eventos extremos hidrometeorológicos recorrentes. O estudo de diagnóstico da bacia identificou diversos eventos de emergência/calamidade pública relacionados à disponibilidade de água, registrados pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil entre os anos de 1970 e 2015 (GAMA, 2016). Observou-se que a quantidade de registros históricos se divide quase igualmente entre eventos de déficit (estiagem e seca) e superávit hídrico (inundações, enxurradas e alagamentos).

6.2.2 Configuração do Modelo SWAT+ para a BHRC

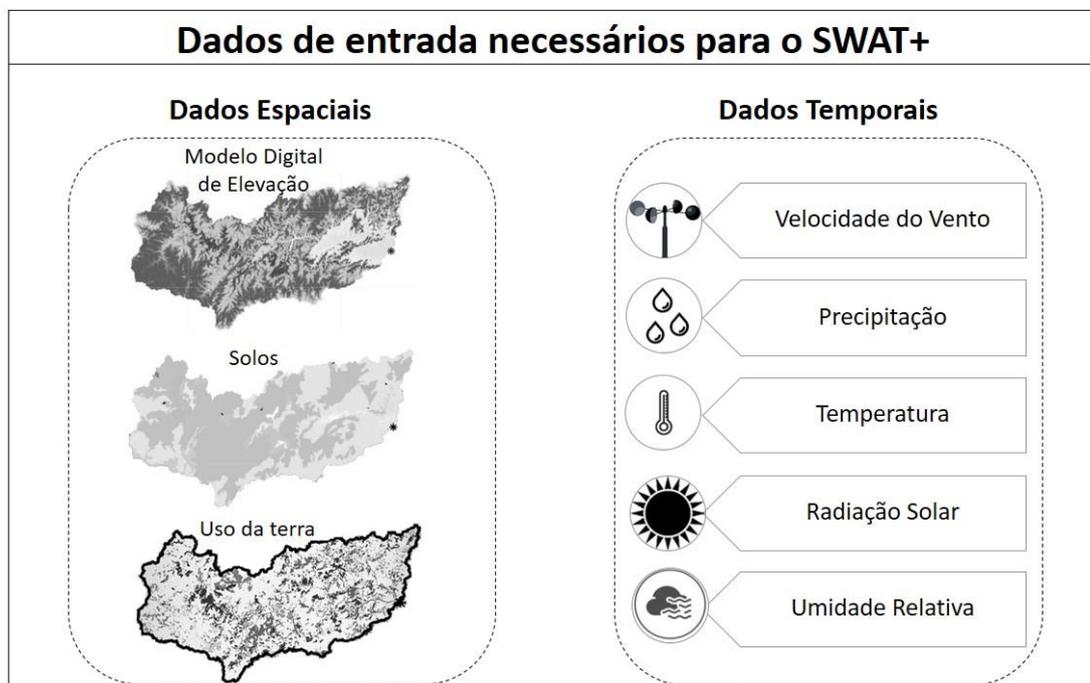
A modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Camaquã utilizou a seção de controle Passo do Mendonça, monitorada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), como exutório para as simulações, cuja área de drenagem à montante do posto de monitoramento tem 15.573 km². A seleção deste ponto de controle se deu em razão do longo período de monitoramento.

A modelagem se deu por meio do SWAT+ (BIEGER *et al.*, 2017), um modelo hidrológico computacional gratuito, desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA) dos Estados Unidos,

com a Texas A&M University, que compila uma série de informações, tanto de bases físicas quanto climáticas; fato que permite a simulação de diversos cenários.

O modelo SWAT+ conta com a integração entre interfaces de SIG (Sistemas de Informações Geográficas), com o intuito de permitir o uso de ferramentas de geoprocessamento como suporte às etapas da modelagem, assim como tornar a alimentação do modelo e a compreensão dos processos mais intuitiva. Para este estudo, a versão modificada SWAT+ (rev 60.5.7) foi empregada. O processamento dos dados de entrada foi realizado na interface do QSWAT+ (rev 2.4), em uma extensão do software livre de código aberto QGIS, e no SWAT+ Editor (versão 2.3). Já as análises estatísticas e procedimentos para a calibração se valeram do SWAT+ Toolbox (versão 1.0.5), ferramenta para análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo. Os dados de entrada necessários para a modelagem hidrológica no SWAT+ compreendem informações espaciais em formato matricial - *raster*, dados tabulares e informações hidrometeorológicas, como esquematizado na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura da base de dados de entrada necessários ao SWAT+. Fonte: Autora

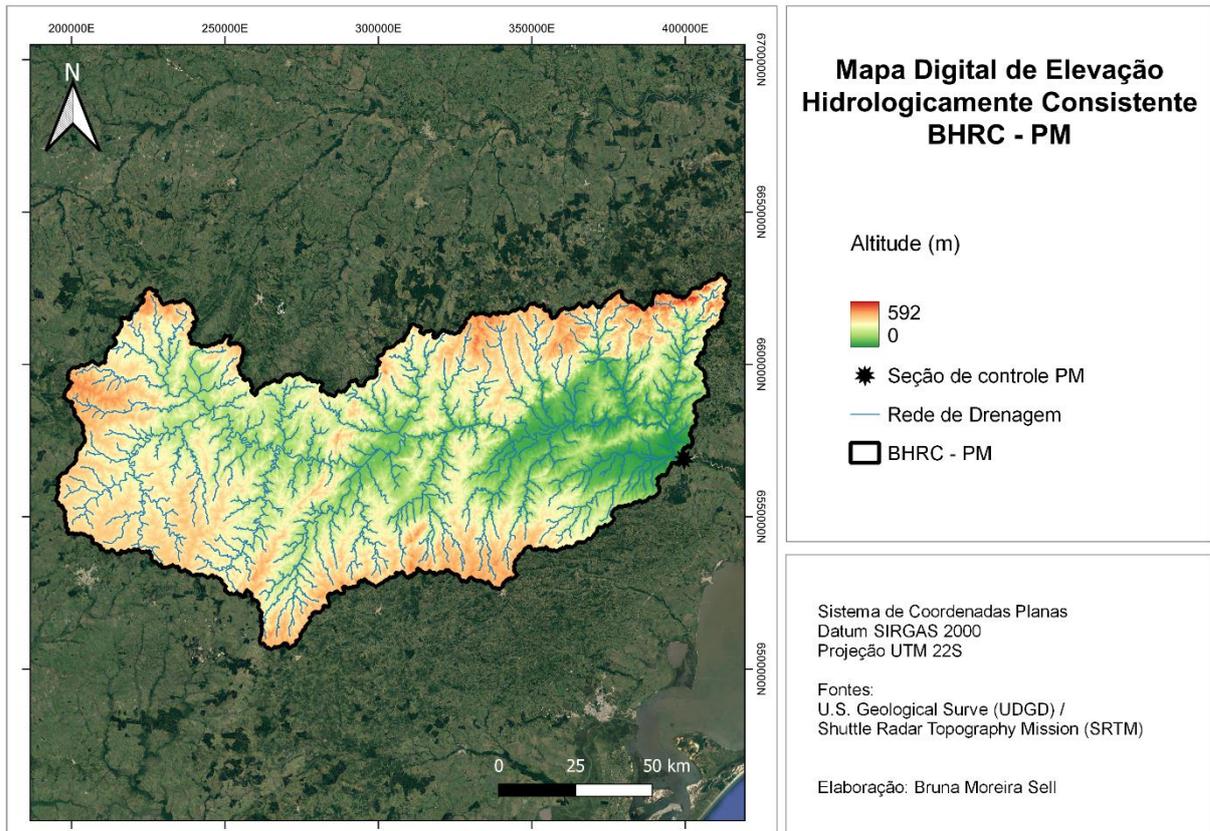


6.2.2.1 Base de dados espacial para a modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica com o SWAT+ se vale de representações da bacia hidrográfica em sub-bacias, em unidades de paisagem (áreas inundáveis ou mais altas) e na sequência em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) – áreas com os mesmos atributos de cobertura da terra, tipo de solo, declividade e unidades de paisagem (Arnold *et al.*, 2012). Apesar de muitas instituições e centros de pesquisa disponibilizarem dados de forma livre e gratuita, no Brasil observa-se um grande impasse relacionado à constituição de uma sólida base de dados, pois são diversas as fontes necessárias de consulta. Um trabalho dispendioso, mas que agrega maior confiabilidade à representação dos processos hidrológicos na bacia de interesse.

O Modelo digital de elevação (MDE) foi obtido junto ao site do *U. S. Geology Survey* (USGS), proveniente do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), cuja imagem possui resolução espacial de 30 metros (USGS, 2020). O MDE hidrológicamente consistente (MDEHC) da BHRC foi obtido após o tratamento do preenchimento de possíveis depressões espúrias, Figura 5. A partir do MDEHC foi gerada a rede de drenagem, no QSWAT+. Para gerar a rede de drenagem adotou-se como critério a quantidade de células convergentes, definida por áreas maiores ou iguais a 80km² (88.800 células).

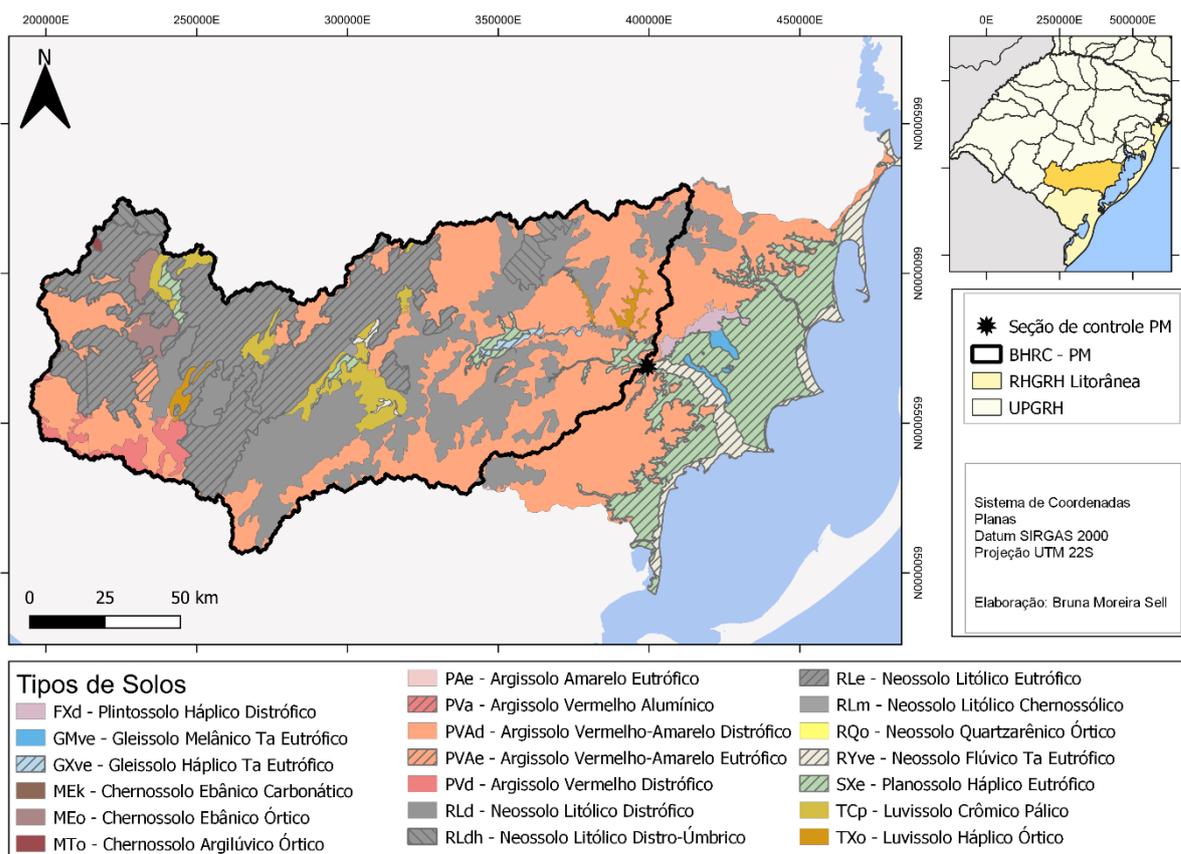
Figura 5 - Mapa hipsométrico da BHRC. Fonte dos dados: SRTM, 2020.



O mapa de tipos de solos da BHRC foi constituído a partir da união de mapas pedológicos do Projeto RADAMBRASIL, atualizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com escala 1:250.000 (IBGE, 2020). Foi realizado o agrupamento das mesmas classes de solos até o terceiro nível categórico. Ao todo, 16 tipos de solos foram identificados na área da bacia, como mostra a distribuição espacial retratada pela Figura 6.

Pode-se verificar, na Figura 6, que a área de estudo apresenta predominância de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) e Neossolo Litólico distrófico (RLd) e eutrófico (RLd). Essas classes de solo juntas representam 87,15% da área, sendo as demais pouco significativas. Bezerra (2006) aponta que a característica entre solos distróficos e eutróficos está relacionado a saturação de bases, com reflexos na fertilidade natural e, portanto, na necessidade ou não de adubação para fins agrícolas.

Figura 6 - Mapa de solos da BHRC. Fonte: Autora



Para cada classe de solo, uma série de dados tabulares referentes às propriedades físico-hídricas são necessárias para a modelagem chuva-vazão no SWAT+ (Arnold *et al.*, 2012a). Devido à complexidade em determinar todas estas variáveis que caracterizam os tipos de solos da bacia, foi realizada metodologia descrita em Bressiani (2016); se recorreu ao emprego da planilha eletrônica desenvolvida por Balaji e Dhanesh (2011), que compila funções de pedotransferência para a estimativa dos parâmetros necessários ao modelo. As informações necessárias para a estimativa dos demais parâmetros foram: a profundidade da camada de solo, percentual de argila, silte, areia, cascalho e carbono orgânico, estas obtidas em estudos de campo de solos elaborados por pesquisadores da Embrapa em diversos municípios do estado do Rio Grande do Sul (Cunha *et al.*, 2001; Cunha *et al.*, 2010; Cunha *et al.*, 2000; Cunha *et al.*, 2005; Cunha *et al.*, 1998; Cunha *et al.*, 1997; Cunha *et al.*, 2006a; Cunha *et al.*, 2006b). Da mesma forma, cada tipo de solo foi associado ao seu respectivo grupo hidrológico conforme classificação proposta por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005).

O mapa de usos dos solos empregado neste estudo foi elaborado pelo Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com escala de 1:250.000 (Hofmann *et al.*, 2015), que retrata a condição do uso e da cobertura vegetal no ano de 2015. A decisão de selecionar o mapeamento feito no ano de 2015 em detrimento dos demais disponíveis foi pautada no fato de esta ser a condição de uso mais atual disponível, além de compreender o período de calibração do modelo. Os diferentes usos dos solos encontrados na BHRC foram associados às classes existentes no banco de dados do modelo (Arnold *et al.*, 2012a), conforme apresentado na Figura 7 e na Tabela 1.

Figura 7 - Mapa de uso e cobertura do solo da BHRC. Fonte: Autora

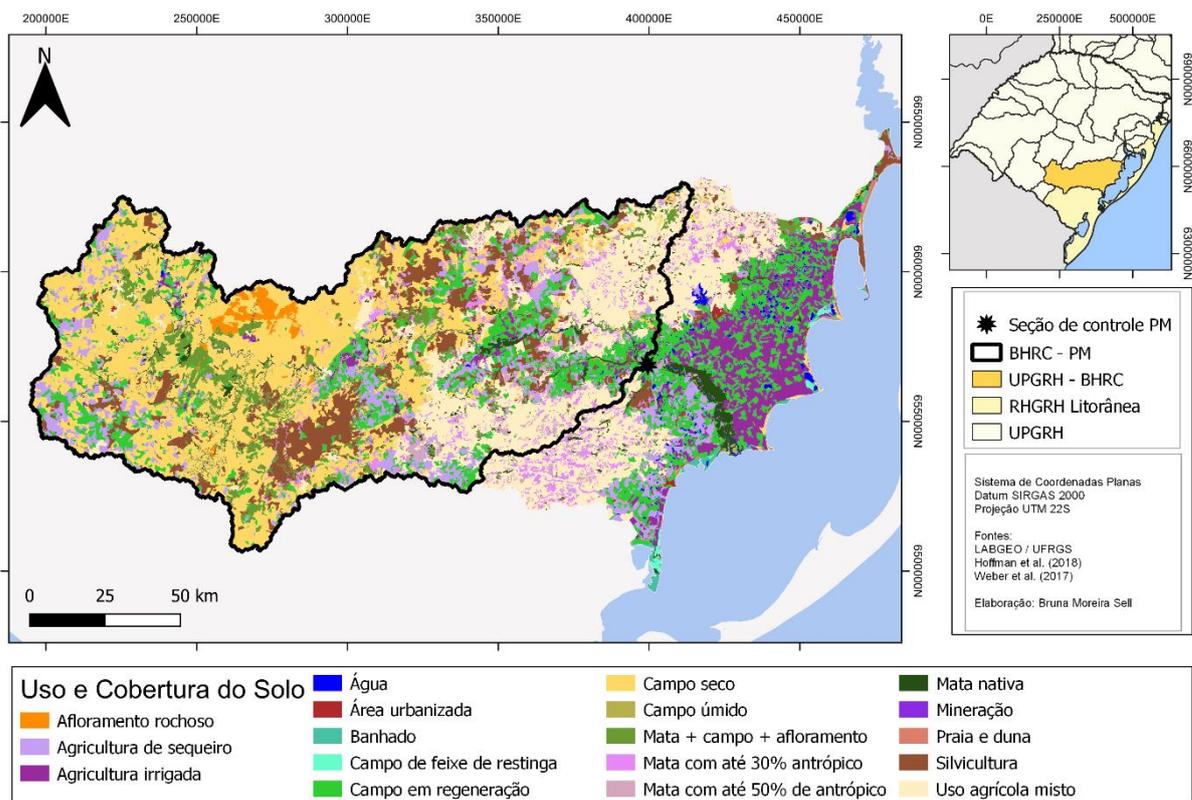


Tabela 1 - Equiparação dos Usos do Solo da BHRC no SWAT+

Identificador	USO	Código de referência SWAT+
1	Água	WATR
2	Mata Nativa	FRSE
3	Silvicultura	PINE
4	Campo Seco	RNGE
5	Campo Úmido	WETL
6	Banhado	WETL
7	Agricultura Irrigada	RICE
8	Agricultura de Sequeiro	SOYB
9	Uso Agrícola Misto	AGRR*
11	Praia e Duna	RNGE
12	Afloramento Rochoso	URBN
13	Área Urbanizada	URBN
14	Mineração	BARR
22	Mata com até 30% de Uso Antrópico	FRST
23	Mata Com Até 50% de Antrópico	FRST
24	Mata + Campo + Afloramento	FRSE
44	Campo de Feixe de Restinga	RNGB
49	Campo em Regeneração	RNGE

* 55% = TOBC e 45% = CORN

Nota-se, a partir das informações apontadas na Tabela 1, que os usos referentes à silvicultura, agricultura irrigada e agricultura de sequeiro foram atrelados às culturas preponderantes a cada um destes, sendo respectivamente: pinus, arroz e soja. Já o uso agrícola misto foi condicionado ao fumo (55%) e milho (45%). A tomada de decisão foi embasada em uma extensa investigação de informações verificadas na literatura (AGEFLOR, 2023; Beier, Poletto, Ferreira, 2018; Beier, Poletto, Ferreira, 2019; Cunha *et al.*, 2000; IBGE, 2017).

Uma inovação da versão modificada SWAT+ em relação à versão anterior é a possibilidade da discretização espacial em unidades de paisagem. Esta funcionalidade permite ao usuário incorporar ao modelo a melhor demarcação de zona ripária, através da separação das áreas alagáveis (floodplain) de áreas altas (Upslope) (Bieger *et al.*, 2019). O método empregado foi o DEM Inversion, com limiar de declividade de 10%. De modo a respeitar a variabilidade espacial dos atributos físicos da bacia, o método de geração de múltiplos HRU foi adotado, com a opção de realizar este filtro com base no percentual das áreas de paisagem, com valor de variação menor ou igual a 20%.

Foi configurado o modelo SWAT+ com exutório na seção de controle Passo do Mendonça (estação da ANA), e assim a bacia modelada ficou com área total de 15.573,07km². Área que foi subdividida em 123 sub-bacias e 3.356 HRUs - resultado da combinação de diferentes informações de uso do solo, tipos de solo e declividade do terreno (Tabela 2).

Tabela 2 - Distribuição das HRUs na BHRC-PM

			Área (Km ²)	Área (%)
Uso da Terra	Milho	CORN	1245.74	8.00
	Fumo	TOBC	1522.57	9.78
	Campo Seco	RNGE	8855.31	56.86
	Mata + Campo + Afloramento	FRSE	859.33	5.52
	Mata com até 30% de Uso Antrópico	FRST	278.99	1.79
	Silvicultura	PINE	1745.04	11.21
	Agricultura de Sequeiro	SOYB	788.11	5.06
	Agricultura Irrigada	RICE	62.31	0.40
	Água	WETW	4.51	0.03
	Área Urbanizada	URBN	207.67	1.33
	Mineração	BARR	2.95	0.02
Campo Úmido / Banhado	WETL	0.53	0.00	
Solos	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	PVAd	5662.98	36.36
	Argissolo Vermelho alumínico	PVa	6.10	0.04
	Neossolo Litólico Distrófico	RLd	3590.14	23.05
	Neossolo Litólico distro-úmbrico	RLdh	375.54	2.41
	Neossolo Litólico eutrófico	RLe	4320.05	27.74
	Chernossolo Ebânico órtico	MEo	211.40	1.36
	Luvissolo Crômico pálico	TCp	580.75	3.73
	Planossolo Háptico eutrófico	SXe	267.18	1.72
	Luvissolo Háptico órtico	TXo	81.76	0.53
	Chernossolo Argilúvico órtico	MTo	10.33	0.07
	Neossolo Fluvico Ta eutrofico	RYve	38.39	0.25
	Gleissolo Háptico eutrófico	GXve	44.01	0.28
	Neossolo Litólico chernossólico	RLm	8.06	0.05
	Argissolo Vermelho distrófico	PVd	294.47	1.89
	Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico	PVAe	81.90	0.53
Chernossolo Ebânico carbonático	MEk		0.00	
Declividade	Plano	0% - 3%	542.10	3.48
	Suave Ondulado	3% - 8%	4776.55	30.67
	Ondulado	8% - 20%	8452.55	54.28
	Forte Ondulado	20% - 45%	1797.07	11.54
	Montanhoso	45% - 75%	4.81	0.03
	Escarpado	> 75%		0.00

6.2.2.2 Base de dados hidrometeorológicos

Na área da BHRC foram identificados três postos fluviométricos monitorados pela ANA, são eles: Passo do Cação (87590000) 1987-2008; Passo das Carretas (87670000) 2000-2020; e, Passo do Mendonça (87905000) 1987-2020 – exutório da bacia deste estudo.

Os dados hidrometeorológicos demandados pelo SWAT+ são: radiação solar (W/m^2), precipitação (mm), temperatura máxima ($^{\circ}C$), temperatura mínima ($^{\circ}C$), umidade relativa do ar (%), e velocidade média do vento (m/s). Essas informações foram obtidas de cinco estações meteorológicas convencionais localizadas no entorno da BHRC, com dados observados entre os anos de 1961 e 2020 disponibilizadas pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia - BDMEP (INMET, 2020). No entanto, como o INMET disponibiliza dados de insolação e não de radiação solar, esta última foi calculada com base na insolação utilizando a planilha desenvolvida por Bressiani (2012).

Cabe ressaltar que, foram utilizados, também, dados de precipitação de estações pluviométricas monitoradas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020). Foram verificadas todas as estações pluviométricas existentes em um raio de 50 km da bacia delimitada. Para tanto, foi empregado o arquivo vetorial em formato *shapefile* que contém os pontos das estações, adquirido junto ao Catálogo de Metadados da ANA, da Rede Hidrometeorológica Nacional (ANA, 2019). Ao total, foram identificadas 143 estações pluviométricas, sendo que apenas 69 que possuíam informações. Após a definição do período de simulação, entre os anos de 1987 e 2020, 32 estações pluviométricas foram descartadas por não atenderem ao período estabelecido. Assim, passou-se a considerar 37 estações pluviométricas para todo o período, das quais 15 estão dentro dos limites da bacia. Uma análise de consistência foi conduzida, a fim de identificar falhas e valores incoerentes. Esta etapa foi conduzida com o emprego do *software System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* – SYHDA (Vargas *et al.*, 2019). Os valores destoantes foram excluídos.

Para o preenchimento das falhas se recorreu a técnica de interpolação pelo método de interpolação do inverso da distância (IDW) através de rotinas computacionais (Bressiani, Rotava, 2020). Rotinas computacionais de pré-processamento desenvolvidas por Bressiani e Rotava (2020), disponíveis no Github,

foram utilizadas para a conversão de formato das saídas em conformidade com o SWAT+ Editor.

Para a importação dos dados meteorológicos no SWAT+ Editor, foi realizado o cálculo das estatísticas por meio da planilha eletrônica de Biosramé (2011), bem como a conversão das mesmas para o formato exigido pelo modelo.

6.2.3 Parametrização

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT+, na escala diária, é baseado na equação do balanço hídrico (NEITSCH *et al.*, 2009):

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

Onde:

SW_t - conteúdo final de água no solo no dia t (mm H₂O);

SW_0 - conteúdo de água inicial no solo no dia i (mm H₂O);

t - tempo (dias);

R_{day} - precipitação no dia i (mm H₂O);

Q_{surf} - escoamento superficial no dia i (mm H₂O);

E_a - evapotranspiração no dia i (mm H₂O);

w_{seep} - conteúdo de água na zona vadosa do perfil do solo no dia i (mm H₂O);

Q_{gw} - fluxo de retorno da água subterrânea no dia i (mm H₂O).

Neste contexto, visto que o modelo SWAT+ permite adequar os métodos e valores iniciais dos parâmetros hidrológicos de forma simples, no presente estudo foram modificados os campos relacionados diretamente com o escoamento superficial (*CN method flag* e *esco*), subsuperficial (*latq_co*) e subterrâneo (*rchg_dp* e *alpha_bf*), bem como os dados iniciais referentes às características fisiológicas mais marcantes dos cultivares representados em cada uso do solo (*IAF*) com o intuito de melhorar as aproximações do balanço hídrico simulado com os valores de referência para a região. As alterações realizadas (Tabela 3) se basearam em intensa revisão literária, aliadas ao conhecimento dos modeladores e as técnicas/ferramentas disponíveis.

O método de estimativa da curva número (CN), inicialmente configurado pelo método que utiliza a umidade do solo, foi substituído pela opção que se vale da aproximação que tem como função a evapotranspiração da cultura, enquanto a alteração do parâmetro *esco* foi motivado pelo entendimento que o *default* é muito elevado para a condição física da bacia.

Definidas as séries de vazões médias diárias, sistematizadas e consistidas, lançou-se mão da ferramenta *baseflow filter* (Arnold *et al.*, 1995; Arnold, Allen, 1999; Bressiani, 2016). Essa técnica automatizada realiza a separação dos escoamentos direto e subsuperficial potencial. As delimitações dos fluxos foram extraídas para as três sub-bacias, cujos exutórios correspondem aos postos fluviométricos monitorados pela ANA (Passo do Cação - 87590000; Passo das Carretas - 87670000; e, Passo do Mendonça – 87905000), com a proposição de novos valores do parâmetro *alpha_bf*, relativo ao fator alpha da curva de recessão de água subterrânea do aquífero, o que regula, portanto, o fluxo de base.

Por fim, o parâmetro *latq_co* foi ajustado manualmente com o objetivo de implicar em simulações com contribuições mais significativas de escoamento lateral. Da mesma maneira, motivado pela melhor caracterização do cultivares representativos de cada uso do solo, o parâmetro *IAF* foi ajustado (Vargas, 2021), como mostra a Tabela 4.

Tabela 3 – Modificações Realizadas

Edição dos dados de entrada SWAT+		Parâmetro	Padrão	Adotado
Conexões > Aquíferos/Editar	Recarga para o aquífero profundo (a fração da percolação da zona radicular que atinge o aquífero profundo)	rchg_dp	0.05	0.2
	Taxa de fluxo de base quando toda a área está contribuindo para o fluxo de base	alpha_bf	0.048	0.0524
			0.048	0.0601
			0.048	0.0496
Bacias > Códigos	Seleção do método CN	CN method flag	0	1
Hidrologia > Hidrologia/Editar	Coefficiente número da curva de evapotranspiração da planta	latq_co	0.01	0.5
	Coefficiente de compensação de evaporação do solo	esco	0.95	0.9

Tabela 4 - Alteração do Índice de Área Foliar

Dados de inicialização > Comunidades de plantas/Editar	FRSE	FRST	PINE	RNGE
	4.085	0.6	4.01	2.9325

6.2.4 Análise de sensibilidade

No presente estudo, o método Sobol (Sobol, 1990 apud Nossent; Ellen; Bauwens, 2011) foi empregado. O método de Sobol tem uma estrutura probabilística, considerado uma metodologia de análise de sensibilidade baseado na variância. Nossent, Ellen e Bauwens (2011) concluíram que o método é aplicável ao SWAT, da mesma forma que se observou a boa performance do método em modelagens ambientais (Estrada, Diaz, 2010; Xu *et al.*, 2012). A análise de sensibilidade foi realizada no software SWAT+ Toolbox, inicialmente com 18 parâmetros, listados na Tabela abaixo, com seus valores definidos em intervalos. Apenas os nove mais sensíveis foram selecionados para a calibração do modelo para a BHRC.

Tabela 5 - Parâmetros e intervalos definidos para realizar a análise de sensibilidade

Nome do parâmetro	Descrição	Valor Mínimo Absoluto	Valor Máximo Absoluto	Unidade
cn2.hru	Número da curva SCS (condição de umidade II)	35	95	-
ovn.hru	Coefficiente de Manning para fluxo terrestre	0.01	30	-
slope.hru	Inclinação média da encosta	0.0001	0.9	m/m
lat_time.hru	Tempo de retorno do fluxo lateral	0.5	180	dia
latq_co.hru	Coefficiente número da curva de evapotranspiração da planta	0	1	-
canmx.hru	Armaezamento máximo do dossel	0	100	mm/H ₂ O
esco.hru	Coefficiente de compensação de evaporação do solo	0	1	-
z.sol	Profundidade das camadas do solo	0	3500	mm
bd.sol	Densidade aparente úmida	0.9	2.5	mg/m ³
awc.sol	Capacidade de água disponível	0.01	1	mmH ₂ O/mm
k.sol	Condutividade hidráulica saturada	0.0001	2000	mm/hr
surlag.bsn	Coefficiente de defasagem do escoamento superficial	0.05	24	dia
chn.rte	Coefficiente de Manning para o canal principal	-0.01	0.3	-
alpha.aqu	Fator alfa para curva de recessão de aquífero profundo	0	1	dia
bf_max.aqu	Fator alfa de fluxo de base máximo	0.1	2	mm
flo_min.aqu	Limite de profundidade de água no aquífero raso necessário para que o fluxo de retorno ocorra	0	50	m
revap_co.aqu	Coefficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada	0.02	0.2	-
revap_min.aqu	Profundidade limite de água no aquífero raso para que ocorra a percolação para o aquífero profundo	0	50	m

6.2.5 Calibração e Validação

A calibração foi realizada de forma semiautomática (Bressiani, 2016). Optou-se por calibrar a bacia com os dados do período mais recente, entre os anos de 2005 e 2020, com períodos de cheia e seca bem definidos, utilizando três anos (2002 a 2004) para o aquecimento do modelo a fim de minimizar as incertezas existentes, principalmente aquelas relacionadas à umidade antecedente do solo e conteúdo de água no aquífero raso (Beskow *et al.*, 2016; Bressiani *et al.*, 2015b; Caldeira *et al.*, 2019). A calibração foi conduzida em passos de tempo mensal e diário, nesta sequência, respectivamente.

O algoritmo usado na calibração automática foi o Dynamically Dimensioned Search (DDS). O DDS é um algoritmo de otimização global, indicado para circunstâncias complexas com muitos parâmetros, tal como o desafio de calibrar modelos hidrológicos (Tolson, Shoemaker, 2007; Zamani *et al.*, 2021). A calibração automática foi conduzida no software SWAT+ Toolbox (Chawanda, 2023) tomando como função objetivo a medida estatística Nash-Sutcliffe (NSE), a qual é conhecida por dar maior importância à acurada estimativa de vazões mais elevadas (Viola *et al.*, 2009). Este critério foi embasado na necessidade de melhorar o ajuste dos picos, verificada a partir da comparação visual dos hidrogramas observados e simulados. Como o critério do algoritmo é exclusivamente o número máximo de iterações especificadas pelo usuário, cada rodada foi simulada com até 100 rodadas do modelo.

A partir dos resultados das iterações da calibração automática, também foi feita uma avaliação, por calibração manual, a partir da experiência dos modeladores, entre as rodadas, provendo ajustes para as rodadas seguintes da calibração automática. Para tal analisou-se com inspeção visual o formato do hidrograma simulado, bem como em diferentes métricas de avaliação, com base nas medidas estatísticas tradicionalmente empregadas na avaliação de ajustes de modelos hidrológicos Nash Sutcliffe (NSE), erro médio quadrático (MSE), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e percentual de viés (PBIAS); muito utilizadas para avaliação da calibração do modelo SWAT (Bressiani *et al.*, 2015a; Bressiani *et al.*, 2015b; Bressiani, 2016; Moriasi *et al.*, 2007).

Após a calibração do modelo, o modelo com os parâmetros ajustados, foi testado para a validação, entre os anos de 1987 a 2002. O desempenho estatístico

do modelo calibrado e validado foi avaliado pela classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007) (Tabela 6).

Tabela 6 – Critério de avaliação de performance estatística. Fonte: Moriasi *et al.* (2007).

Performance	Critério NSE	Critério PBIAS
Muito bom	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS \leq 10\%$
Bom	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$10\% < PBIAS < 15\%$
Satisfatório	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$15\% \leq PBIAS < 25\%$
Insatisfatório	$NSE \leq 0.50$	$25\% \leq PBIAS$

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Calibração e Validação

O modelo hidrológico SWAT+ foi calibrado para a realidade da BHRC-PM considerando apenas os parâmetros mais sensíveis obtidos na etapa de análise de sensibilidade (Tabela 7). A análise de sensibilidade revelou que o modelo foi mais sensível ao parâmetro relativo ao fator topográfico (slope). Da mesma forma, o modelo apresentou grande sensibilidade aos parâmetros relacionados ao escoamento superficial (cn2, latq_co e surlag). Este resultado converge com as constatações obtidas por Silva *et al.* (2023), que indicam que esses parâmetros são alguns dos mais usados e mais sensíveis para a simulação da vazão e se relacionam diretamente com as características de uso da terra, sendo altamente sensíveis em modelos de bacias agrícolas e de pastagens.

Tabela 7 - Parâmetros e intervalos definidos para realizar a análise de sensibilidade

Nome do parâmetro	Descrição	Valor Padrão		Unidade
		Mínimo Absoluto	Máximo Absoluto	
cn2.hru	Número da curva SCS (condição de umidade II)	35	95	-
ovn.hru	Coeficiente de Manning para fluxo terrestre	0.01	30	-
slope.hru	Inclinação média da encosta	0.0001	0.9	m/m
latq_co.hru	Coeficiente número da curva de evapotranspiração da planta	0	1	-
esco.hru	Coeficiente de compensação de evaporação do solo	0	1	-
awc.sol	Capacidade de água disponível	0.01	1	mmH ₂ O/mm
surlag.bsn	Coeficiente de defasagem do escoamento superficial	0.05	24	dia
chn.rte	Coeficiente de Manning para o canal principal	-0.01	0.3	-
revap_co.aqu	Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada	0.02	0.2	-

Para a obtenção dos melhores valores ajustados foram realizadas 100 simulações para cada iteração – foram realizadas 100 iterações. Na Tabela 8 são apresentados os valores calibrados.

Tabela 8 - Parâmetros calibrados do modelo SWAT com seus valores padrão e calibrados.

Nome do parâmetro	Descrição	Unidade	Tipo de variação	Intervalo utilizado na calibração		Melhor ajuste
				Valor mínimo	Valor máximo	
awc	Capacidade de água disponível	mm_H2O/mm	percentual	-10	10	-8.06
chn	Coeficiente de Manning para o canal principal	-	soma	-0.02	0.02	0.02
cn2	Número da curva SCS (condição de umidade II)	-	percentual	-10	10	-9.21
esco	Coeficiente de compensação de evaporação do solo	-	substitui	0.78	0.90	0.78
latq_co	Coeficiente número da curva de evapotranspiração da planta	-	substitui	0.87	1.00	0.97
ovn	Coeficiente de Manning para fluxo terrestre	-	percentual	-20	20	1.50
revap_co	Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada	-	substitui	0.02	0.03	0.02
slope	Inclinação média da encosta	m/m	percentual	-20	20	3.99
surlag	Coeficiente de defasagem do escoamento superficial	dias	soma	-10	10	-3.10

Nota: percentual – variação percentual do valor padrão

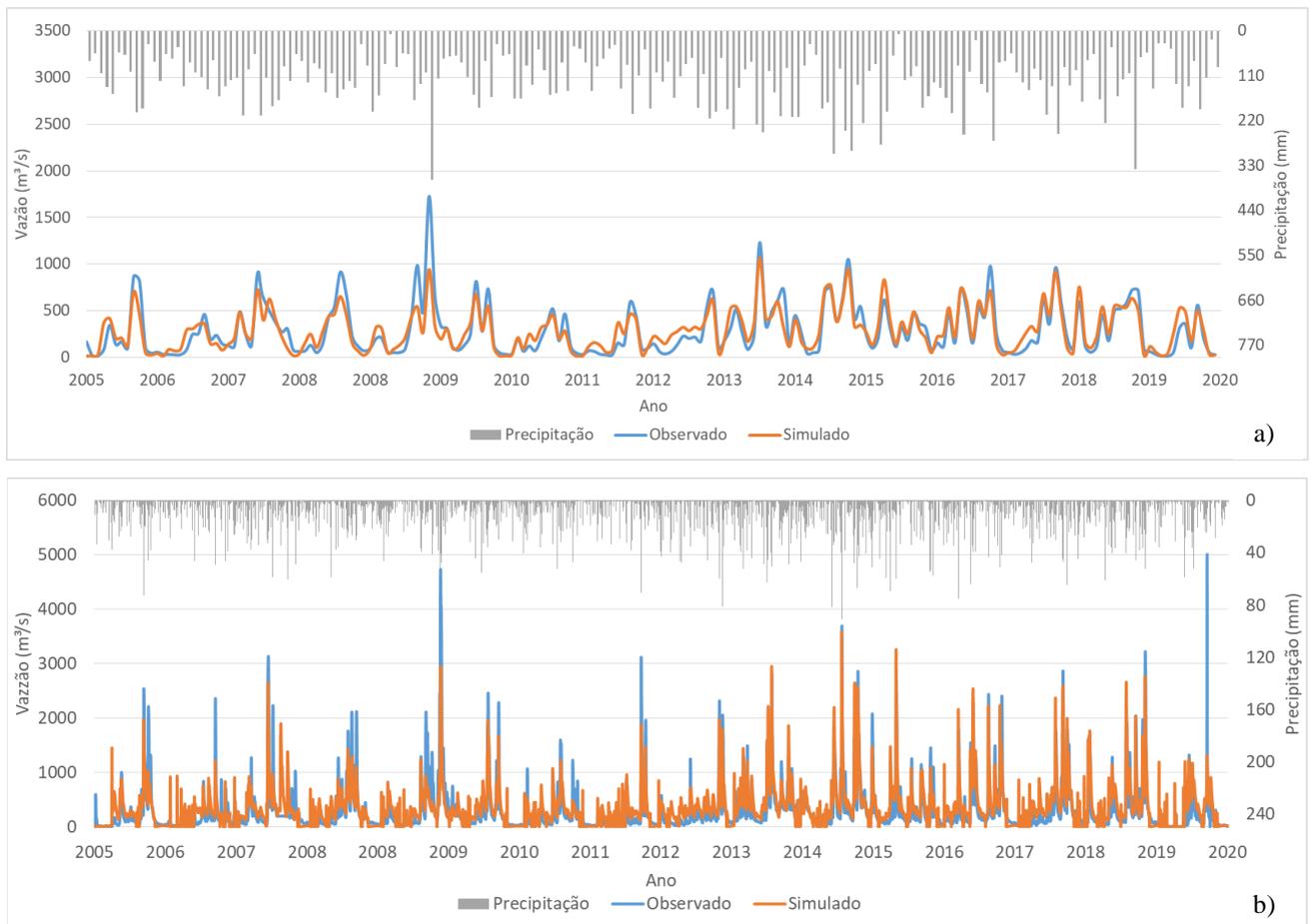
soma – variação absoluta adicionada ao valor padrão

substitui – variação absoluta, substituição do valor padrão

A Figura 8 apresenta os resultados da calibração, no passo de tempo mensal e diário. A comparação entre os hidrogramas observado e simulado para o período de 2005 a 2020 mostra que, de modo geral, o modelo representou satisfatoriamente o comportamento das vazões médias mensais (Figura 8 – a). A simulação evidencia a capacidade do modelo calibrado em responder adequadamente as entradas de chuvas de forma temporal; ou seja, o modelo tem a habilidade de representar as inflexões do hidrograma tanto na ascensão quanto nos períodos de recessão. Entretanto, nota-se a tendência de subestimativa das vazões nos eventos extremos, principalmente nas vazões de picos mais expressivos.

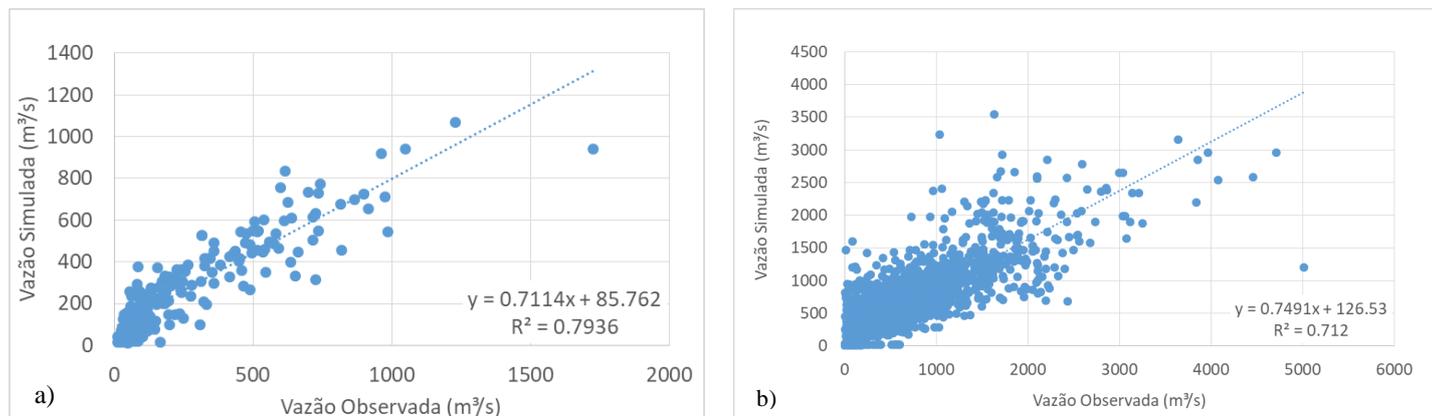
A limitação do modelo em expressar valores aderentes às máximas vazões médias observadas é mais acentuada na escala diária, como mostra a Figura 8 – b. Assim como verificado em Pereira *et al.* (2014), Steinmentz (2020) e Viola *et al.* (2009) visto que, como aponta Caldeira (2019), a subestimativa das vazões de pico é comum em modelagem hidrológica. Observa-se também que para as vazões registradas durante os períodos de estiagem a simulação superestima os dados observados.

Figura 8 – Calibração BHRC - PM, no passo de tempo a) mensal e b) diário.



É relevante destacar que embora a análise visual seja imprescindível para a verificação dos processos físicos simulados, é crucial que o desempenho do modelo seja analisado sob a ótica estatística. A Figura 9 apresenta a dispersão dos dados. O desempenho estatístico do modelo calibrado, resultou em $NSE=0,79$, $RMSE=128,63$ e $PBias= -0,95$ no passo de tempo mensal e $NSE=0,69$, $RMSE= 238,13$ e $PBias=-18,78$ no passo de tempo diário.

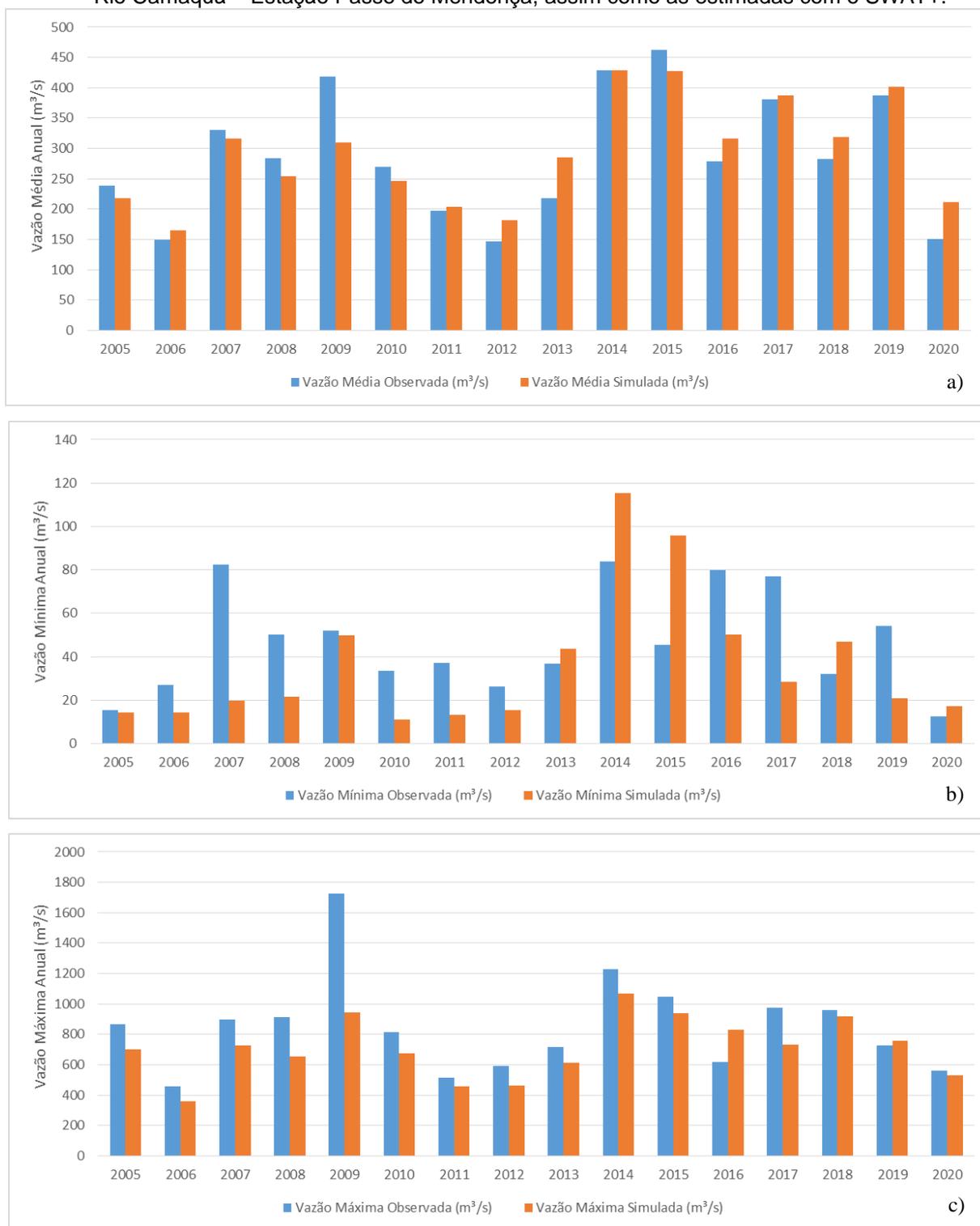
Figura 9 – Diagrama de dispersão da etapa de calibração - vazões observadas e simuladas no passo de tempo: a) mensal e b) diário.



A Figura 9-b confirma a interpretação da análise visual dos hidrogramas, atestando que a simulação no passo de tempo diário envolve maior dispersão dos valores estimados pelo modelo em face aos dados registrados. Segundo Beskow *et al.* (2011), a calibração de modelos hidrológicos em escala diária pode ser mais desafiadora ao estimar vazões de pico em bacias com baixo tempo de concentração ou alta sensibilidade a eventos de chuva de curta duração. Contudo, é relevante apontar que tal diferença não implica em inviabilidade técnica do modelo, uma vez que, o desempenho estatístico do modelo calibrado no passo de tempo mensal e diário tem ajuste muito bom e bom, respectivamente, segundo a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007) (Tabela 6).

De modo a extrair melhores indicadores sobre a performance do modelo calibrado a Figura 10 reúne a comparação entre os valores observados e as simulações de vazão para os valores médios, máximos e mínimos anuais.

Figura 10 - Vazões médias (a), mínimas (b) e máximas (c) observadas para a bacia hidrográfica do Rio Camaquã – Estação Passo do Mendonça, assim como as estimadas com o SWAT+.



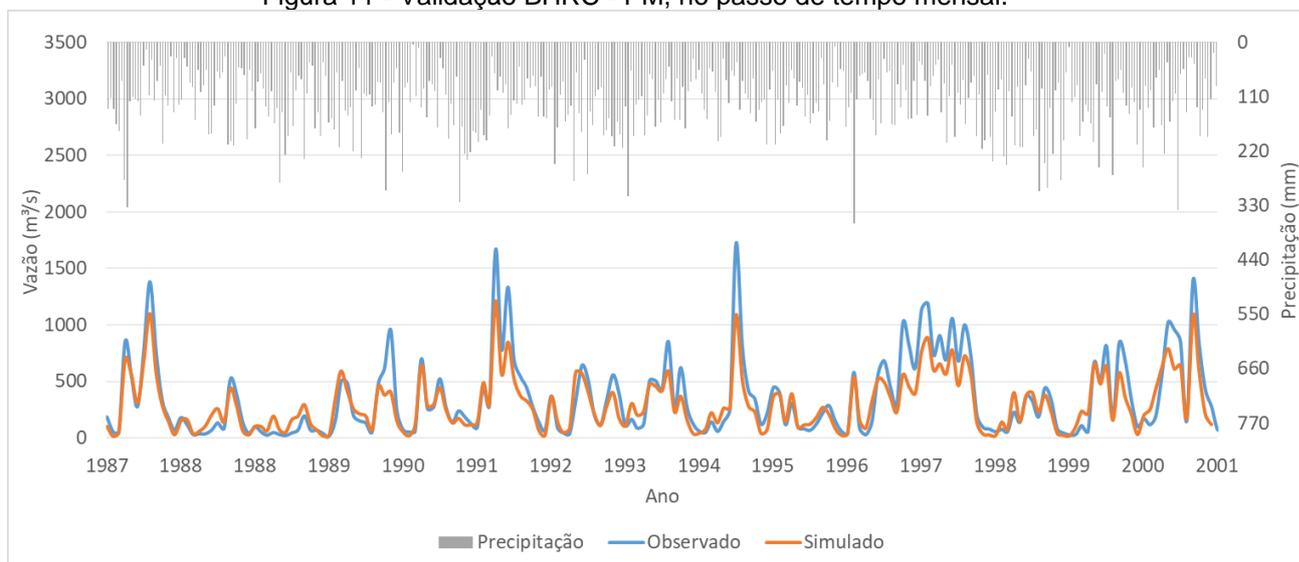
As vazões médias simuladas (Figura 10a) representaram de forma consistente o comportamento dos valores médios observados durante o período de calibração, refletindo a boa capacidade do modelo em reproduzir o regime hidrológico da bacia.

Embora tenha ocorrido uma leve superestimação das vazões médias anuais, com um desvio médio de 5% acima dos valores observados, essa diferença não compromete a qualidade das simulações. A superestimação foi mais evidente em anos mais secos, como 2020 (40%), 2013 (31%) e 2012 (24%), enquanto em 2009 (-26%) e 2008 (-10%) o modelo subestimou as vazões médias.

No caso dos eventos extremos, tanto mínimos (Figura 10b) quanto máximos anuais (Figura 10c), o modelo apresentou algumas dificuldades na reprodução exata dos valores, com subestimação média de 17% para as vazões mínimas e 14% para as máximas. Ainda assim, os resultados são satisfatórios e demonstram que o modelo é uma ferramenta confiável para representar o comportamento hidrológico da bacia, capturando adequadamente sua variabilidade ao longo do tempo.

A validação também foi realizada na estação hidrométrica da BHRC-PM, aplicando ao modelo os mesmos parâmetros calibrados (Tabela 8), porém para o período da série histórica de dados entre 1º de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 2001. Na Figura 11 é apresentado o hidrograma, o qual performou desempenho estatístico do modelo validado de NSE= 0,80, RMSE= 152,88 e PBias= 15,00 no passo de tempo mensal.

Figura 11 - Validação BHRC - PM, no passo de tempo mensal.

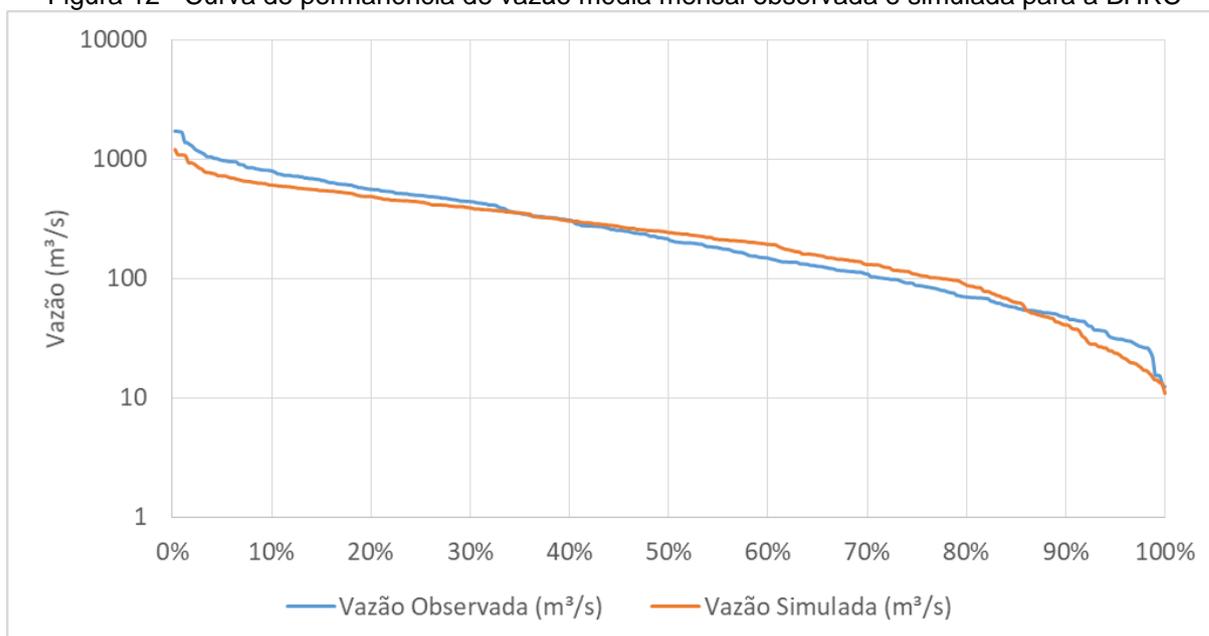


Na validação constatou-se que o modelo teve um melhor desempenho, se comparado ao processo de calibração. Destaca-se que o modelo apresentou tendência a subestimar as vazões reproduzidas nas escala de tempo mensal. O

coeficiente estatístico PBias reproduz exatamente esse comportamento – valores positivos indicam uma subestimação do modelo, e valores negativos superestimação (MORIASI *et al.*, 2007). Os indicadores estatísticos, obtidos na etapa de validação, confirmam a eficiência do modelo hidrológico.

A curva de permanência (Figura 12) das vazões médias mensais apresenta a frequência das observadas e as vazões estimadas pelo SWAT+, para todo o período 1987-2020 (calibração e validação).

Figura 12 - Curva de permanência de vazão média mensal observada e simulada para a BHRC



A curva de permanência reforça as constatações previamente discutidas. Para eventos extremos, tanto de vazões máximas quanto mínimas, os resultados obtidos pela modelagem hidrológica tendem a subestimar os valores. Por outro lado, para vazões com permanência entre 40% e 85% do tempo, observa-se uma tendência de superestimação. A Tabela 9 apresenta as vazões de referência, proporcionando uma visão detalhada desses resultados.

Tabela 9 - Vazões de referência da curva de permanência e suas respectivas vazões médias observadas e estimadas para a BHRC

Vazão de referência	Observada (m³/s)	Simulada (m³/s)	Diferença (%)
Q5%	985	726	-26%
Q10%	797	610	-24%
Q50%	210	244	16%
Q90%	48	41	-14%
Q95%	32	24	-24%

Na área da BHRC é reduzida a quantidade de estudos destinados à calibração e validação de outros modelos hidrológicos, o que limita as discussões frente a performance do modelo empregado. Todavia, o estudo de Pedrollo e Lanna (2003) que traz uma abordagem metodológica baseada em um sistema para a previsão, sob forma de categorias difusas, verificou que a complexidade da BHRC-PM impõe dificuldades para o estabelecimento de padrões em técnicas de aprendizado. Neste sentido, a adoção de modelagem hidrológica tende a reproduzir resultados mais precisos e aplicáveis.

Foram localizados os estudos conduzidos por Lopes (2015), Lopes *et al.* (2018) e Vargas (2021) quanto à calibração e validação de outros modelos hidrológicos na BHRC-PM. Entretanto, é oportuno destacar que os resultados, em muitas situações, não são diretamente comparáveis entre si em virtude de análises e configurações específicas, como por exemplo, a adoção de períodos diferentes de calibração e validação, bem como o nível de detalhamento da discretização espacial e temporal que cada simulação usa.

Lopes (2015) aplicou o modelo MGB-IPH com método inercial de propagação de vazões para fazer a representação hidrológica e hidráulica nas bacias hidrográficas constituintes da Laguna dos Patos. A autora calibrou (01/01/1990 - 31/12/2010) e validou (01/01/1970 – 31/12/1989) o modelo hidrológico, onde obteve resultados com bom desempenho, com valores de NSE de 0,69 e 0,66, respectivamente. Neste estudo, Lopes (2015) revelou que apesar dos picos do hidrograma simulado superestimarem um pouco os valores extremos observados, de modo geral, os hidrogramas concordam, sendo o regime hidrológico bem representado tanto para os picos de vazão quanto para a vazão de base.

Na investigação realizada em Lopes *et al.* (2018) foi proposto utilizar o modelo MGB-IPH com o objetivo de integrar a simulação hidrológica e hidrodinâmica, a fim de testar a ferramenta como um meio de realizar a previsão de cheias, com foco na estimativa dos níveis de água e áreas inundadas, na Bacia da Lagoa dos Patos. O modelo foi calibrado e validado considerando as sub-bacias da BHRC-PM, com resultados muito bons NSE = 0,76 para o período de calibração (01/01/1990 – 31/12/2010) e similares para a validação.

Vargas (2021) calibrou e validou o modelo LASH para a BHRC-PM. A autora confrontou as diferenças nas respostas hidrológicas, por meio da calibração de modo

concentrado e de forma distribuída por sub-bacia, ambos na escala diária, e com a adoção de dois algoritmos de calibração. Os resultados alcançados em ambos cenários foram muito bons para a escala mensal, com NSE = 0,84 e NSE 0,78 para o cenário de simulação concentrada e distribuída, respectivamente.

Frente às investigações científicas citadas, torna-se evidente a necessidade de explorar abordagens técnicas para a modelagem ecohidrológica da BHRC-PM, haja vista sua relevância para a região sul do país. Nesse contexto, é imprescindível considerar a utilização de diferentes modelos hidrológicos com características variadas, uma vez que cada modelo possui suposições e simplificações próprias para representar os processos hidrológicos. A análise comparativa entre modelos permite identificar incertezas intrínsecas, aprimorar a compreensão dos processos envolvidos e aumentar a confiabilidade das projeções. Assim, os resultados alcançados suprem essa lacuna e fornecem uma valiosa ferramenta para a gestão integrada dos recursos hídricos na área de interesse.

Ao analisar o balanço hídrico, para períodos longos, considerando totais anuais, é razoável assumir a variação do armazenamento de água no solo como nula ao longo do ano hidrológico, pois há uma compensação entre períodos de déficit e superávit hídrico (Collischonn e Dornelles, 2015).

A comparação entre o balanço hídrico simplificado obtido neste estudo e os valores de referência estimados para a Bacia do Atlântico Sul (Conejo *et al.*, 2005) indica diferenças de aproximadamente -8% na precipitação anual, -12% na evaporação anual e +12% no escoamento anual. Essas discrepâncias podem estar associadas à incerteza inerente aos valores de referência, uma vez que a Bacia do Atlântico Sul abrange uma extensa faixa litorânea, com grande variabilidade climática e hidrológica ao longo de diferentes estados brasileiros. Assim, os valores médios estimados para toda a bacia podem não representar com precisão as condições específicas da área de estudo, a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC). Ainda assim, os resultados simulados apresentam uma boa aderência às referências disponíveis na literatura, reforçando a coerência da modelagem realizada.

6.4 Conclusão

A seleção criteriosa dos dados de entrada espaço-temporal do modelo, construída com acesso a fontes públicas, reproduziram boa caracterização da área de estudo que, atrelada aos dados hidrometeorológicos consistentes e robustos propiciaram resultados muito satisfatórios, tanto para as simulações realizadas na escala de tempo mensal quanto no passo de tempo diário.

A parametrização inicial refletiu na boa capacidade do modelo em simular o balanço hídrico, o qual representou muito bem a precipitação total anual verificada na região a qual a BHRC-PM está inserida. Ainda que os valores totais anuais relativos ao processo de evapotranspiração e deflúvio total anual tenham apresentado pequenos desvios daqueles verificados na literatura disponível, cabe mencionar que estes processos são altamente dependentes dos usos e ocupação do solo. Logo, como a área deste estudo utilizou como exutório a seção de controle Passo do Mendonça, a qual desconsidera a faixa nordeste da BHRC e onde as atividades agrícolas irrigadas são concentradas, os resultados alcançados reforçam a confiabilidade do modelo em representar o balanço hídrico anual.

Ao analisar as saídas do modelo, os resultados obtidos no estudo indicam que o modelo SWAT+ apresentou performance muito boa ao simular a resposta hidrológica da BHRC-PM na base mensal, conforme apoiam os indicadores estatísticos de calibração e validação, com $NSE=0.79$ e $NSE=0.80$, respectivamente. As simulações diárias também obtiveram resultados consistentes, com bom desempenho na calibração do modelo, onde se alcançou o valor de $NSE=0.69$ e $NSE=0.73$ na validação. A performance satisfatória do SWAT+ atende às demandas de gestão hídrica, planejamento agrícola e urbano na região.

A adoção de um modelo hidrológico semi-distribuído representativo, como o SWAT+, possibilita a simulação de diferentes cenários e amplia a compreensão dos processos hidrológicos em bacias de grande porte. Além disso, a capacidade preditiva do modelo é fundamental para planejar ações de adaptação a eventos hidrológicos extremos, apoiar a tomada de decisão em setores estratégicos e promover um uso mais eficiente dos recursos hídricos.

Neste contexto, este estudo contribui ao validar o modelo SWAT+ como uma ferramenta técnica robusta para monitoramento e gestão de recursos hídricos no

bioma pampa, representando um avanço significativo para a modelagem hidrológica em bacias de grande porte. Os resultados obtidos demonstram a aderência do modelo às condições hidrológicas da região, oferecendo uma base confiável para futuras pesquisas e aplicações. Dessa forma, os achados deste trabalho fortalecem o embasamento técnico-científico necessário para apoiar iniciativas voltadas à segurança hídrica, planejamento territorial e conservação ambiental em áreas com características similares.

6.5 Referências

AGEFLOR, Associação Gaúcha de Empresas Florestais. **O Setor de Base Florestal no Rio Grande Do Sul – 2022**. Disponível em <http://www.ageflor.com.br/noticias/wp-content/uploads/2022/12/ANUARIO-AGEFLOR-2022-WEB.pdf>

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Catálogo de Metadados ANA**. Rede Hidrometeorológica Nacional. Brasília, SNIRH, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156>. Acesso em 28 set. 2020.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Portal HidroWeb**. Disponível: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 28 set. 2020.

ARNOLD, J. G. *et al.* Automated base flow separation and recession analysis techniques. **Groundwater**, v. 33, n. 6, p. 1010-1018, 1995.

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

ARNOLD, J. G. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J. G. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012**. Texas: Texas Water Resources Institute, 2012a. TRF-439.

ARNOLD, J. G. *et al.* Use of decision tables to simulate management in SWAT+. **Water**, v. 10, n. 6, p. 713, 2018.

ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

BAJRACHARYA, A. *et al.* Time Variant sensitivity analysis of hydrological model parameters in a cold region using flow signatures. **Water**, v. 12, n. 4, p. 961, 2020.

BALAJI, N.; DHANESH, Y. **Excel template calculates SWAT soil parameters using the Pedo Transfer Function (PTF)**. Comunicação Pessoal. 2011.

BEIER, E. V.; POLETO, C.; FERREIRA, M. E. M. C. Natural characterization of the low course of the Camaquã River in Cristal city-RS. **Revista eletrônica em gestão e tecnologia ambiental. Santa Maria, RS**, 2019.

BEIER, E. V.; POLETO, C.; FERREIRA, M. E. M. C. Processos antrópicos e a caracterização do baixo de curso do Rio Camaquã no município de Cristal-RS. **Encontro Regional de Geografia (4.: 2018 out.: Maringá, PR). Anais. Maringá-Paraná: Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Geografia, 2018**, 2018.

BESKOW, S., MELLO, C.R., NORTON, L.D., SILVA, A.M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v. 86, n. 3, p. 160-171, 2011.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resources Management**, v. 27, p. 341-363, 2013.

BESKOW, S. *et al.* Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, Southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, p. 2567–2578, 2016. DOI: 10.1080/02626667.2015.1133912.

BEVEN, K. How far can we go in distributed hydrological modelling?. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2001.

BEZERRA, J. F. **Solo: substrato da vida**. EMBRAPA Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, 2006.

BIEGER, K. *et al.* Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 1, p. 115-130, 2017.

BIEGER, K. *et al.* Representing the connectivity of upland areas to floodplains and streams in SWAT+. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 55, n. 3, p. 578-590, 2019.

BIOSRAMÉ, G. **WGN Excel Macro for SWAT**. 2011. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/software/>

BRESSIANI, D. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRESSIANI, D. *et al.* Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **Int J Agric & Biol Eng**, v. 8, n. 3, p. 125–139, 2015b.

BRESSIANI, D. A. **Planilha para cálculo de Radiação Solar, com base na Insolação**. Comunicação Pessoal. 2012.

BRESSIANI, D. *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, 2015a.

BRESSIANI, D. A.; ROTAVA, J. **Scripts em Python para Processamento de Dados de Precipitação e Interpolação para o formato do Soil & Water Assessment Tool**. 2020. Acessado em 15 de jul. 2020. Disponível: <https://github.com/SWAT-Brasil/util/>

CALDEIRA, T. L. **Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo**. 2019. 240f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

CALDEIRA, T. L. *et al.* LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena**, v. 173, p. 183-193, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.10.009

CALDEIRA, T. L. *et al.* Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: Uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 22-32, 2018.

CAMPOS, F. *et al.* Modelagem hidrológica da bacia do Rio Iconha-ES: potencialidades, desafios e soluções para pequenas bacias hidrográficas. **Geoconexões**, v. 3, n. 20, p. 78-104, 2024a.

CAMPOS, F. *et al.* Uso do modelo hidrológico SWAT+ para quantificação e espacialização de processos em apoio ao planejamento ambiental. **Revista Pantaneira**, v. 24, p. 119-137, 2024b.

CHAWANDA, C. J. **SWAT+ Toolbox v1.0**: documentation. Documentation. 2023. Disponível em: <https://celray.github.io/docs/swatplus-toolbox/v1.0/index.html>. Acesso em: 02 abr. 2023.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: Coleção ABRH, 2015. 336 p.

CONEJO, J.G. L. *et al.* **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. In: Cadernos de Recursos Hídricos. Brasília: ANA. 2005.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudo de solos do Município de Barra do Quaraí - RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2001.84p. Circular Técnica, 30.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de Caiçara - RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 28p. Circular Técnica, 103.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de Camaquã- RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000. 98p. Circular Técnica, 18.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de Encruzilhada do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 83p. Circular Técnica, 45.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudo dos Solos do Município de Pinheiro Machado**. Pelotas: Embrapa -CPACT, 1998. 79p. Documentos, 45.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudo dos Solos do Município de Piratini**. Pelotas: Embrapa-CPACT; Ed. UFPel, 1997. 90 p. Documentos, 26/97.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de São Lourenço do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 47p. Circular Técnica, 52.

CUNHA, N. G *et al.* **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 43p. Circular Técnica, 55.

DEVAK, M.; DHANYA, C. T. Sensitivity analysis of hydrological models: review and way forward. **Journal of Water and Climate Change**, v. 8, n. 4, p. 557-575, 2017.

DOS SANTOS, F. M. *et al.* Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. **Catena**, v. 222, p. 106872, 2023.

ESTRADA, V.; DÍAZ, M. S. Global sensitivity analysis in the development of first principle-based eutrophication models. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 12, p. 1539-1551, 2010.

FARIAS, A.; MENDONÇA, F. Riscos socioambientais de inundação urbana sob a perspectiva do Sistema Ambiental Urbano. **Sociedade & natureza**, v. 34, p. e63717, 2022.

FERREIRA, F. *et al.* Climate change in the Upper Paraguay Basin and hydrological impacts on the Pantanal. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 7, p. 3210-3221, 2024.

FUKUNAGA, D. *et al.* Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

GAMA, Engenharia e Recursos Hídricos. **PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CAMAQUÃ: Relatório Executivo 2015 I 2035**. Relatório Final. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2016.

GAMA, Engenharia e Recursos Hídricos. **RT3 – Diagnóstico da bacia**. Serviços de Consultoria Relativo ao Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Camaquã Fases A, B e C Relatório Final. 2015.

GARNA, R. K. *et al.* Watershed model parameter estimation in low data environments. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 45, p. 101306, 2023.

GASSMAN, P. W. *et al.* The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GOUDARZI, F. M.; SARRAF, A.; AHMADI, H. Calibration of SWAT and three data-driven models for monthly stream flow simulation in Maharlu Lake Basin. **Water Supply**, v. 21, n. 8, p. 4219-4238, 2021.

GULL, S.; SHAH, S. Watershed models for assessment of hydrological behavior of the catchments: a comparative study. **Water Practice and Technology**. v. 15, n. 2, p. 261-281, 2020. doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.030>

GUPTA, A.; GOVINDARAJU, R. S. Propagation of structural uncertainty in watershed hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 66-81, 2019.

HAO, F. *et al.* Coupling the Xinanjiang model with geomorphologic instantaneous unit hydrograph for flood forecasting in northeast China. **International Soil and Water Conservation Research**, v.3, p. 66-76, 2015.

HARIFIDY, R. Zy *et al.* Multi-gauge calibration comparison for simulating streamflow across the Major River Basins in Madagascar: SWAT+ Toolbox, R-SWAT, and SWAT+ Editor Hard calibration. **Hydrology Research**, v. 55, n. 3, p. 412-430, 2024.

HOFMANN, G.S. *et al.* **Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2015**. Porto Alegre: UFRGS IB Centro de Ecologia, 2015. 1a ed. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/labgeo>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário, Florestal e Agrícola 2017**. 2017. Acessado em 16 jul. 2021. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>

JOVINO, E. S. *et al.* Impacts of land use and land cover on sediment production in a tropical peri-urban water source area. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p. e64640, 2022.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* Comparative hydrology: relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 6, p. 1187-1195, 2014.

LOPES, V. A. R. **Modelagem hidrológica integrada da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos e seus complexos lagunares usando o modelo MGB-IPH com propagação inercial de vazões**. 2015. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES, V. A. R. *et al.* A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal of hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.011.

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

MOGES, E. *et al.* Review: Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. **Water** 13 (1), 28. 2020.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NEITSCH, S. L. *et al.* Overview of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model. In: **SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT): GLOBAL APPLICATIONS**. 4. ed. Bangkok: World Association Of Soil And Water Conservation, 2009. p. 3-24.

NETO, J. O. M. *et al.* Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014.

NOSSANT, J.; ELSEN, P.; BAUWENS, W.. Sobol'sensitivity analysis of a complex environmental model. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1515-1525, 2011.

OLIVEIRA, L. T. *et al.* Hydrological simulation of a small forested catchment under different land use and forest management. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 13, n. 4, p. 301, 2020.

ORTH, R. *et al.* Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 147-159, 2015.

PBMC, 2016: Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p.

PEREIRA, D. R. *et al.* Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p. 789-799, 2014.

SANTOS, C. *et al.* Using a hierarchical approach to calibrate SWAT and predict the semi-arid hydrologic regime of northeastern Brazil. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1137, 2018.

SANTOS, F. M.; OLIVEIRA, R. P.; MAUAD, F. F. Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 29, p. 100685, 2020.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; 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.

SEMA, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **L030 - Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã**. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/l030-bh-rio-camaqua>. Acesso em: 01 mar. 2021.

SILVA, T. P. *et al.* Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production. **International soil and water conservation research**, v. 12, n. 1, p. 121-136, 2024.

SILVA, T. P. *et al.* Evaluating hydrological and soil erosion processes in different time scales and land uses in southern Brazilian paired watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 10, p. 1391-1408, 2023.

SILVA, M. P. **Monitoramento e modelagem hidrológica sub-horária no bioma Pampa: nanobacia na estação experimental na UFSM**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

SIQUEIRA, P. P. *et al.* Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, 2021.

STEINMETZ, A. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias hidrográficas do Pampa brasileiro**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pelotas.

SWAT, Soil & Water Assessment Tool. **Software & Data Tools**. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/>. Acesso em: 23 set. 2020

TAPAS, M. R. *et al.* Evaluating combinations of rainfall datasets and optimization techniques for improved hydrological predictions using the SWAT+ model. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 57, p. 102134, 2025.

TEGEGNE, G. *et al.* Hydrological modelling uncertainty analysis for different flow quantiles: a case study in two hydro-geographically different watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 4, p. 473-489, 2019.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. **Water Resources Research**, v. 43, n. 1, 2007.

TRENTIN, R.; LAURENT, F.; DE SOUZA, L. Vazão e balanço hídrico relacionado a mudanças no uso da terra em uma bacia hidrográfica de médio porte no bioma Pampa do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 873, 2023.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 669 p. 2005.

USGS, U.S. Geological Survey. **Shuttle Radar Topography Mission**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

VARGAS, M. M. **Concepção do modelo hidrológico LASH em MATLAB®: aprimoramento da propagação em rios e da calibração**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

VARGAS, M. M. *et al.* SYHDA – System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, p. 1, 2019.

VEITH, T. L. *et al.* Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 5, p. 1477-1486, 2010.

VIOLA, M. R. *et al.* Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.581-590, 2009.

WAGENA, M. B. *et al.* Quantifying model uncertainty using Bayesian multi-model ensembles. **Environmental Modelling & Software**, v. 117, p. 89-99, 2019.

XU, J. *et al.* Sobol'sensitivity analysis of parameters in the common land model for simulation of water and energy fluxes. **Earth Science Informatics**, v. 5, p. 167-179, 2012.

ZAMANI, M. *et al.* Advancing model calibration and uncertainty analysis of SWAT models using cloud computing infrastructure: LCC-SWAT. **Journal of Hydroinformatics**, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2021.

ZHAN, Che-sheng *et al.* An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters. **Environmental Modelling & Software**, v. 41, p. 39-52, 2013.

7 Artigo 2 – Simulação Hidrológica Futura de uma Bacia Hidrográfica Representativa do Bioma Pampa sob Diferentes Cenários Climáticos

Resumo

As mudanças climáticas afetam diretamente o ciclo hidrológico, alterando a disponibilidade hídrica e a frequência de eventos extremos. Este estudo simula as vazões futuras na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC) utilizando o modelo SWAT+, com base nas projeções climáticas dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 entre os anos de 2006-2099, baseando-se nos modelos CANES, BESM e MIROC. Os resultados indicaram tendência de aumento nas vazões médias anuais até meados do século XXI, seguido por possíveis reduções sob o cenário RCP 8.5 nas últimas décadas do período analisado. A intensificação do ciclo hidrológico pode levar a desafios na gestão hídrica, exigindo estratégias de adaptação para lidar com variações extremas. Conclui-se que a compreensão dessas tendências é essencial para o planejamento sustentável dos recursos hídricos, permitindo a antecipação de períodos críticos e a mitigação de impactos de eventos hidrológicos extremos.

Palavras-chave: variabilidade climática, cenários futuros, hidrologia, planejamento estratégico, SWAT+.

Abstract

Climate change directly influences the hydrological cycle, altering water availability and the frequency of extreme events. This study simulates future streamflows in the Camaquã River Watershed (BHRC) using the SWAT+ model, based on climate projections from RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios for the period 2006 to 2099, considering the CANES, BESM, and MIROC models. The results indicate a trend of increasing annual average streamflows until the mid-21st century, followed by potential reductions under the RCP 8.5 scenario in the last decades of the analyzed period. The intensification of the hydrological cycle may pose challenges for water resource management, requiring adaptation strategies to cope with extreme variations. Understanding these trends is essential for sustainable planning, enabling the anticipation of critical periods and the mitigation of impacts associated with extreme hydrological events.

Keywords: climate variability, future scenarios, hydrology, strategic planning, SWAT+.

7.1 Introdução

O nexo Água-Alimentos-Energia-Ecosistemas (WFEE, do inglês Water-Food-Energy-Ecosystems) constitui um arcabouço essencial para a compreensão das interdependências entre os recursos naturais e os setores críticos da sociedade (Bervoets *et al.*, 2018). Em bacias hidrográficas, esses elementos estão profundamente interligados, uma vez que a água é essencial para a produção de

alimentos, geração de energia, manutenção dos ecossistemas e suporte ao desenvolvimento urbano (Sarkar *et al.*, 2021). A crescente pressão sobre esses recursos, impulsionada pela expansão dos centros urbanos e agrícolas, levou a escassez generalizada de água em diversas regiões (Mekonnen, Hoekstra, 2016), destacando a necessidade de um gerenciamento integrado e sustentável (Doll *et al.* 2016; Zhang; Xu, Fu, 2014).

Siqueira *et al.* (2021) presumem que as mudanças climáticas devem exacerbar a delicada interação do nexos WFEE, com reflexos na segurança hídrica e, conseqüentemente, no desenvolvimento social devido a intensificação das atividades humanas, que podem comprometer tanto a qualidade quanto a quantidade de água disponível.

Dentre os efeitos das mudanças climáticas, está a percepção de alteração no ciclo hidrológico, que vem registrando o aumento da frequência e magnitude dos extremos climáticos, com chuvas mais intensas e secas mais prolongadas e com mais riscos naturais (Taye *et al.*, 2015). Estima-se que, entre os anos de 1998 e 2017, mais de 4,4 bilhões de pessoas já foram afetadas e precisaram de algum tipo de assistência emergencial em razão dos eventos extremos (Cuartas *et al.*, 2022).

No contexto do bioma Pampa, que no Brasil se localiza na metade sul do Rio Grande do Sul, por todo o Uruguai e em parte da Argentina, o qual é conhecido por sua rica biodiversidade e papel crucial na produção agropecuária, essa dinâmica assume particular relevância. Na porção brasileira, foram observados nos últimos anos, longos períodos de seca intensa (ANA, 2024; Cigana, 2012; Favero, 2011), com redução na disponibilidade de água que levaram a restrições e conflitos entre os usuários; ao passo que em 2023 e 2024 também foram registradas cheias excepcionais com impactos sem precedentes (CNN BRASIL, 2024; Paraguassu, 2024). Análises meteorológicas indicam que estes eventos severos, que afetaram milhares de vidas e causaram danos significativos à infraestrutura regional, estão associados ao aumento da variabilidade climática, diretamente ligados as consequências do aquecimento global (MMA, 2024).

As alterações climáticas projetadas para as próximas décadas adicionam um nível de complexidade a essa equação, com previsões de mudanças nos padrões de precipitação, temperatura e eventos extremos. Essas mudanças podem alterar o balanço hídrico das bacias, afetando a disponibilidade de recursos hídricos para

diferentes usos e a capacidade de manutenção dos ecossistemas (Bressiani *et al.*, 2015). Assim, entender como esses impactos se manifestarão é fundamental para subsidiar decisões relacionadas à gestão integrada dos recursos hídricos (Alves; Gonçalves; Nascimento, 2022).

Nesse cenário, a modelagem hidrológica emerge como uma ferramenta indispensável. Por meio de modelos como o Soil and Water Assessment Tool (SWAT+), é possível simular dinâmicas de bacias hidrográficas sob diferentes cenários de uso e cobertura do solo, além de projeções climáticas futuras (Arnold *et al.*, 1998). Esses modelos permitem avaliar impactos potenciais das mudanças climáticas na disponibilidade e qualidade da água, oferecendo subsídios para o planejamento de estratégias de mitigação e adaptação. Além disso, a modelagem hidrológica desempenha um papel crucial na formulação de políticas públicas baseadas em evidências, contribuindo para a segurança hídrica, o manejo sustentável dos recursos naturais e a resiliência dos territórios frente às mudanças climáticas.

A integração de Modelos Climáticos Globais (MCGs) com modelos hidrológicos tem sido amplamente utilizada para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos (Zhang; Xu; Fu, 2014). No entanto, devido à sua escala global, as projeções fornecidas pelos MCGs podem não representar com precisão as variações climáticas em escalas regionais, o que compromete a confiabilidade na análise de impactos locais — fator essencial para o desenvolvimento de estratégias de adaptação mais adequadas às realidades específicas de cada região (Giorgi; Jones; Asrar, 2009). Nesse contexto, os Modelos Climáticos Regionais (MCRs) surgem como uma alternativa eficaz, pois refinam as projeções globais ao incorporar características climáticas locais com maior nível de detalhe. O aumento da precisão proporcionado pelos MCRs tem impulsionado sua aplicação em diversos estudos voltados para a gestão de recursos hídricos em nível regional (Chou *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2024; Steinmetz, 2020; Silva, 2022).

Cenários representativos de concentração (Representative Concentration Pathways – RCP) foram desenvolvidos e aprovados pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) para compor o AR5 (IPCC, 2013). Cada cenário corresponde a estimativa de concentração de gases de efeito estufa e se baseia em forçantes radioativas de origem antrópica até o final do século XXI (San José *et al.*, 2016).

Existem alguns estudos realizados no Brasil sobre impactos hidrológicos relacionados às mudanças climáticas (Alvarenga *et al.* 2018; Neto *et al.* 2016; Oliveira *et al.* 2019; Oliveira *et al.*, 2024; Santos *et al.* 2019). Porém, somente Caldeira (2019) e Steinmetz (2020) abordam sobre esta temática considerando o bioma Pampa.

Diferentemente desses trabalhos, este estudo se destaca por analisar a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC), uma das maiores bacias inseridas no bioma Pampa na porção brasileira, que até então não havia sido alvo de investigações sobre os impactos das mudanças climáticas em sua hidrologia. Além disso, emprega o modelo SWAT+ e a ferramenta inovadora SWAT+ Toolbox para calibração e validação, proporcionando maior precisão na modelagem hidrológica da bacia. Assim, este estudo contribui significativamente para o entendimento dos impactos climáticos em uma região ainda pouco explorada pela literatura, auxiliando no planejamento e na gestão sustentável dos recursos hídricos do bioma Pampa.

Este estudo teve como objetivo avaliar os impactos de projeções climáticas futuras em uma bacia hidrográfica representativa do bioma Pampa, com foco na compreensão das dinâmicas hídricas e na identificação de períodos críticos para o subsídio a formulação de estratégias de gestão que possam mitigar os efeitos adversos. A investigação foi conduzida na bacia hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC), cuja modelagem hidrológica utilizou o modelo SWAT+, onde foram explorados diferentes cenários climáticos e suas implicações para a disponibilidade dos recursos hídricos, promovendo uma base científica para a formulação de políticas integradas e sustentáveis.

7.2 Material e Métodos

7.2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC) possui uma área de drenagem de 21.657 km², localiza-se na região sul do Brasil e abrange aproximadamente 28 municípios do estado do Rio Grande do Sul (Figura 3). Suas nascentes estão situadas a uma altitude de 553 metros, percorrendo cerca de 430 km até desaguar na Laguna dos Patos.

Inserida no bioma Pampa, a BHRC apresenta extensas áreas de campo natural cobertas por gramíneas, que desempenham um papel essencial na manutenção da biodiversidade local e na oferta de importantes serviços ecossistêmicos, como a regulação do ciclo hidrológico e a sustentação de atividades agropecuárias. A região é caracterizada por uma topografia complexa e irregular, com uma declividade média de 6,5%, e um regime pluviométrico influenciado por uma considerável variabilidade sazonal. A cobertura do solo é dominada por campos secos e terras agricultáveis, sendo os principais tipos de solo encontrados na bacia os argissolos e neossolos, que apresentam diferentes capacidades de retenção de água e fertilidade, influenciando diretamente na produtividade agrícola e na recarga dos mananciais hídricos.

De acordo com a classificação climática de Köppen, conforme descrito por Alvares *et al.* (2013), a BHRC está inserida em uma região de clima subtropical úmido (Cfa), caracterizado por uma ampla variabilidade térmica ao longo do ano. A região sul da bacia é reconhecida como a mais fria do Brasil, com invernos rigorosos, frequentemente acompanhados por geadas, enquanto os verões são quentes e sujeitos a ondas de calor, impactando diretamente o consumo de água e as práticas agropecuárias.

A elaboração do plano de bacia (GAMA, 2016) revelou que a BHRC enfrenta desafios relacionados à ocorrência frequente de eventos climáticos extremos, tanto de excesso quanto de escassez hídrica. Durante períodos de superávit hídrico, as áreas urbanas sofrem com alagamentos, inundações e enxurradas, causando danos à infraestrutura e à população. No meio rural, o excesso de chuvas afeta a produção agrícola, gerando prejuízos econômicos significativos. Em contrapartida, os períodos de déficit hídrico resultam na necessidade de racionamento de água, que em algumas cidades pode durar até 12 horas diárias. Nas áreas rurais, a estiagem compromete a viabilidade do plantio e o abastecimento de comunidades e rebanhos, aumentando a vulnerabilidade socioeconômica.

O monitoramento hidrometeorológico da BHRC conduzido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), integrando a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), conta com 3 estações fluviométricas e 37 estações pluviométricas distribuídas na área de drenagem e em seu entorno. Além disso, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) opera 5 estações meteorológicas na região, permitindo a coleta de dados essenciais para o entendimento do

comportamento hidrológico e a implementação de medidas de gestão de recursos hídricos.

A disponibilidade e qualidade dos dados hidrometeorológicos proporcionam uma base sólida para a modelagem hidrológica da bacia, contribuindo para a análise de cenários futuros e o desenvolvimento de estratégias eficazes de adaptação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas em uma região vulnerável. A Tabela 10 apresenta as principais características da BHRC.

Tabela 10 – Características UHRC

Área (km ²)	21.657	GAMA (2016)
Municípios	28	
População (hab) ¹	356.131	
Precipitação Média Anual (mm) ²	1.475	
Classificação Koppen	Cfa	
Tipo de Solo	PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo (36,4 %)	IBGE (2020)
	RLd - Neossolo Litólico Distrófico (23,0%)	
	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico (27,7%)	
Usos do solo	RNGE - Campos secos (56,9%)	Hofmann <i>et al.</i> (2015)
	AGRR - Uso Argícola Misto (17,8%)	
	PINE - Silvicultura (11,2%)	
Declividade Média (%)	Plano 0% - 3% (3,5%)	EMBRAPA (2018)
	Suave Ondulado 3% - 8% (30,7%)	
	Ondulado 8% - 20% (54,3%)	
	Forte Ondulado 20% - 45% (11,5)	

¹ Censo Demográfico de 2010 realizado pelo IBGE

² Normal Climatológica 1961-1990

7.2.2 Modelagem Hidrológica

Neste estudo, o modelo hidrológico SWAT+ foi utilizado para simular os processos hidrológicos da BHRC. O SWAT+, versão aprimorada do modelo SWAT, é classificado como um modelo chuva-vazão, determinístico, semi-distribuído e semi-conceitual (Bieger *et al.*, 2017). O modelo tem como destaque a capacidade de representar detalhadamente a bacia e os processos hidrológicos, considerando as complexidades topográficas, a variabilidade do uso do solo e as condições climáticas da região de interesse (Arnold *et al.*, 2018; Neitsch *et al.*, 2011).

Optou-se para agregar informações de domínio público, de acesso livre para o set up do modelo. Os dados espaciais de entrada foram obtidos de fontes públicas e incluem o modelo digital de elevação (MDE) proveniente da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução de 30 metros, disponibilizado pelo U. S. Geology Survey (USGS, 2020). O mapa de solos da BHRC foi elaborado a partir da integração de mapas pedológicos do Projeto RADAMBRASIL, atualizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em escala 1:250.000 (IBGE, 2020). O mapa de uso e ocupação do solo, com a mesma escala, foi fornecido pelo Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e representa as condições de 2015 (Hofmann *et al.*, 2015). Os dados climáticos temporais foram obtidos a partir do portal Hidroweb da ANA e das estações de monitoramento climático do INMET. As tomadas de decisão e detalhes sobre os tratamentos e análises realizadas podem ser consultadas no item 6 deste documento.

O modelo foi calibrado utilizando dados da estação fluviométrica Passo do Mendonça, cuja área de drenagem corresponde a 15.573 km² neste ponto. Foram obtidas 123 sub-bacias, e 3356 HRUs - resultado da combinação de diferentes informações de uso do solo, tipos de solo e declividade do terreno.

A calibração e validação do modelo foram conduzidas por meio da ferramenta SWAT+ Toolbox de forma combinada, ou seja, semiautomática. Foi empregado o algoritmo de otimização global, o Dynamically Dimensioned Search (DDS), recomendado para circunstâncias complexas (Tolson; Shoemaker, 2007; Zamani *et al.*, 2021).

Optou-se por calibrar a bacia com os dados do período mais recente, entre os anos de 2002 e 2020, sendo os três primeiros anos utilizados para o aquecimento do modelo. A calibração foi conduzida em passos de tempo mensal e diário, nesta sequência, respectivamente. O desempenho das simulações se baseou nas medidas estatísticas tradicionalmente empregadas na avaliação de ajustes de modelos hidrológicos (Moriasi *et al.*, 2007), são eles: Nash Sutcliffe (NSE), erro médio quadrático (MSE), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e percentual de viés (PBIAS).

A validação seguiu as mesmas premissas da etapa de calibração, com exceção do período usado – entre os anos de 1987 a 2001. O desempenho estatístico do modelo calibrado e validado foi avaliado pela classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007) (Tabela 11).

Tabela 11 – Critério de avaliação de performance estatística. Fonte: Moriasi *et al.* (2007).

Performance	Critério NSE	Critério PBIAS
Muito bom	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS \leq 10\%$
Bom	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$10\% < PBIAS < 15\%$
Satisfatório	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$15\% \leq PBIAS < 25\%$
Insatisfatório	$NSE \leq 0.50$	$25\% \leq PBIAS$

7.2.2.1 Simulação das projeções climáticas

As projeções climáticas futuras para a bacia hidrográfica analisada neste estudo, BHRC, foram obtidas por meio da plataforma PROJETA – Projeções de Mudanças do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo Eta. A plataforma foi desenvolvida pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e disponibiliza um conjunto de variáveis meteorológicas resultantes do processo de regionalização (downscaling) realizado com o modelo climático regional Eta para diferentes Modelos Climáticos Globais (MCGs). As projeções climáticas utilizadas neste estudo foram derivadas dos MCGs BESM, CANESM2 e MIROC5, regionalizados pelo modelo Eta, para os cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5.

Tabela 12 – Modelos climáticos empregados neste estudo

Modelo Climático		País de Origem	Instituição	Referência
CANES	Canadian Earth System Model	Canada	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Arora et al. (2011)
BESM	Brazilian Earth System Model	Brasil	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)	Nobre et al. (2013)
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate	Japão	Center for Climate System Research (CCSR), University of Tokyo	Watanabe et al. (2010)

Fazem parte das variáveis climáticas analisadas: precipitação total (PREC), temperatura máxima do ar a 2 metros da superfície (MXTP), temperatura mínima do ar a 2 metros da superfície (MNTP), umidade relativa do ar a 2 metros da superfície (UR2M), velocidade do vento a 10 metros da superfície (W10M) e radiação de onda curta incidente à superfície (OCIS). Estas informações foram especialmente associadas ao centroide de cada uma das 123 sub-bacias, garantindo uma representação adequada da variabilidade espacial dos dados climáticos do modelo hidrológico.

A plataforma PROJETA fornece dados climáticos do clima passado, correspondente ao período de 1º de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 2005, como também de projeções futuras sob os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5, abrangendo o período de 1º de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2099. Neste estudo, foram utilizados tanto os dados históricos, quanto as projeções futuras.

Os dados do clima passado foram reprocessados pelo modelo hidrológico calibrado e validado. Como o período de validação compreende dados a partir de 01 de janeiro de 1987, a avaliação do hidrograma simulado pelo modelo hidrológico SWAT+ forçado pelos três modelos climáticos, se restringiu ao mesmo intervalo temporal. Foram confrontados os hidrogramas e as curvas de permanência das vazões médias mensais estimadas pelo modelo hidrológico SWAT+ para cada um dos modelos climáticos, a média aritmética das vazões médias mensais estimada pelos modelos climáticos (ensemble), as vazões médias mensais observadas e as simuladas pelo modelo calibrado (BHRC-PM). Os erros nas estimativas das vazões médias mensais foram avaliados segundo o PBIAS (Moriassi *et al.*, 2007). Também foram comparadas as precipitações observadas com as simuladas pelos dados passados.

A análise das projeções climáticas futuras seguiu as mesmas estruturas para avaliação, de modo a confrontar as saídas dos diferentes modelos e assim identificar se há um padrão no comportamento das vazões futuras estimadas. Essa abordagem possibilitou avaliar a robustez das estimativas hidrológicas diante das incertezas associadas aos diferentes modelos climáticos e cenários de emissões.

7.3 Resultados e Discussão

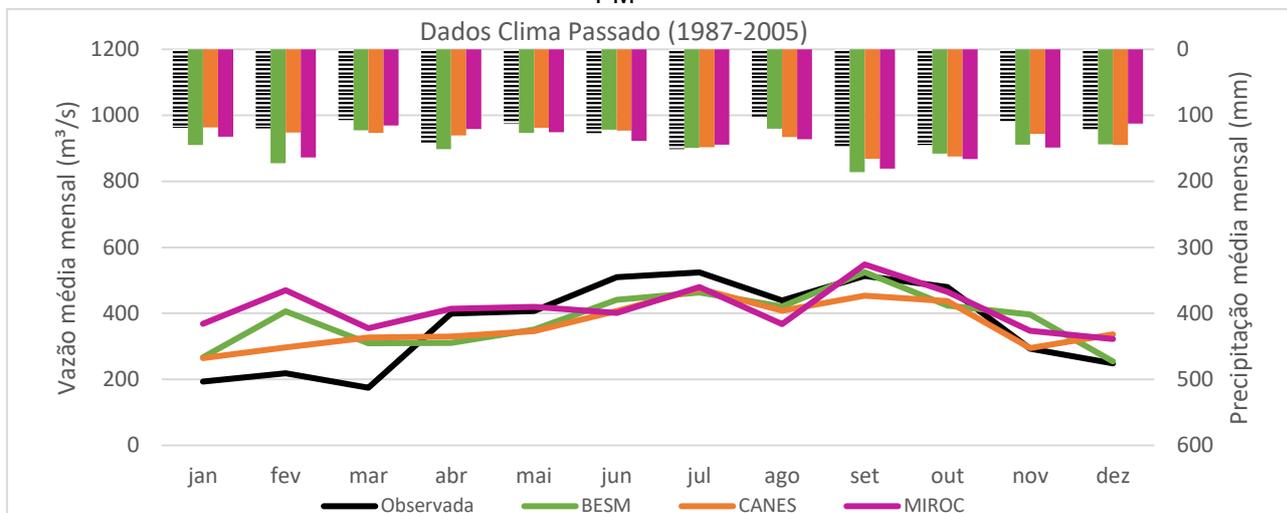
A partir das séries de dados do clima passado, no intervalo de anos entre 1987 e 2005, foram calculados os valores de precipitação média mensal e total anual para os três modelos climáticos considerados (Tabela 13). Ao comparar esses valores com os registros observados na estação Passo do Mendonça (3152011), no mesmo período, constatou-se que todos os modelos climáticos superestimaram a precipitação: BESM em 16%, CANES em 8% e MIROC em 12%.

Tabela 13 – Precipitação observada para a BHRC-PM (1987-2005) e de clima passado (1987-2005) pelos modelos climáticos

	Observada	BESM	CANES	MIROC
Precipitação média mensal (mm)	126	145	135	140
Precipitação total anual (mm)	1507	1742	1625	1686

Ao simular o clima passado no SWAT+, foram estimadas as vazões médias mensais (Figura 13). A simulação do modelo hidrológico SWAT+ da BHRC, forçada pelos modelos climáticos BESM, CANES e MIROC representou de forma satisfatória a variação do comportamento mensal das vazões médias. Contudo, ao confrontar os valores observados com os simulados, percebe-se que entre os meses de janeiro e março os modelos climáticos tendem a representar chuvas acima do verificado, o que por consequência, refletiu na simulação de vazões médias mais elevadas. Ao passo que, entre os meses de abril e agosto, os modelos têm ligeira subestimativa, implicando em reproduções de vazão média mensal inferiores as observadas. O modelo BESM superestimou as vazões médias mensais em 11,1%, o modelo MIROC em 36,9% e o modelo CANES subestimou em 1,6%.

Figura 13 - Vazões médias mensais extraídas da simulação do modelo SWAT+ forçado pelos dados do clima passado, entre 1987-2005, para os modelos climáticos e os registros observados na BHRC-PM



Os resultados estão alinhados às características climáticas do Rio Grande do Sul, que apresenta uma distribuição homogênea de precipitação ao longo do ano, dificultando a previsibilidade de eventos extremos devido às condições geográficas e aos sistemas meteorológicos atuantes (Scaglioni *et al.*, 2023). Contudo, como salienta Steinmetz (2020), as simulações quando comparadas, sejam na escala mensal ou anual, devem reproduzir de modo bastante próximos aos valores observados.

Em estudos conduzidos no bioma Pampa, cuja análise verificou as projeções de clima futuro e o histórico de clima passado destacam-se os trabalhos de Caldeira (2019) e Steinmetz (2020), que também evidenciaram padrões semelhantes em bacias do bioma Pampa, com diferenças entre as simulações e os valores observados, mas mantendo a tendência sazonal.

Caldeira (2019) ao empregar o modelo LASH para a Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo identificou que houve uma subestimativa das vazões médias mensais, quando comparados os dados históricos dos modelos climáticos. Entretanto, a autora destaca que o modelo representou de modo satisfatória a variação sazonal, convergindo nos meses em que as vazões são mais baixas, mas divergem na reprodução de vazões mais elevadas. Dentre os MCGs regionalizados, o modelo CANES apresentou melhores resultados quando comparados os dados de clima passado e valores observados, tal como os resultados alcançados neste estudo.

Steinmetz (2020) também estudou a Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo, porém utilizou o modelo SWAT. As simulações de clima passado foram

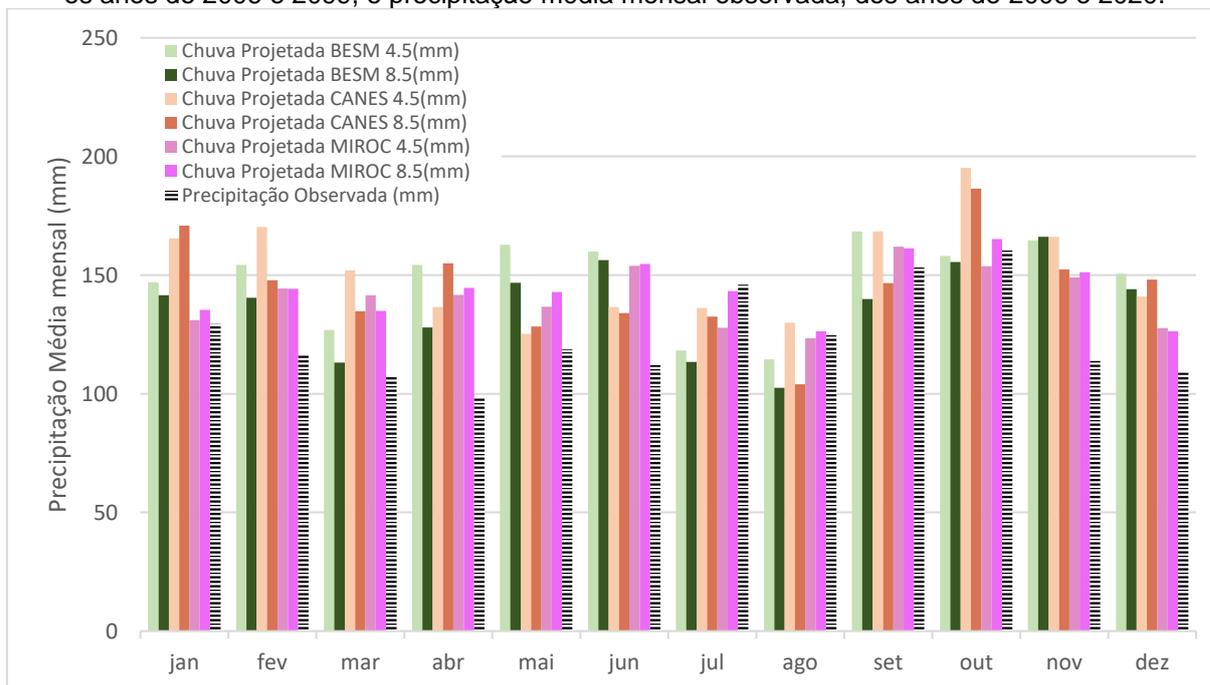
superestimadas pelo modelo, assim como os resultados alcançados no presente estudo. Oliveira *et al.* (2017) conduziram a avaliação de impacto das mudanças climáticas sobre as vazões da bacia do Rio Grande, através do modelo SWAT e também constataram superestimava, apesar dos resultados serem satisfatórios.

As projeções climáticas dos modelos de BESM, CANES, MIROC de precipitação são apresentadas na Figura 14 e os valores médios de cada modelo na Tabela 14, para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Cabe destacar que a precipitação média mensal observada no posto Passo do Mendonça, entre os anos de 1987 e 2005 é de 126 mm e entre os anos de 2006 e 2020 a precipitação média observada é de 124 mm.

Tabela 14 – Precipitação média mensal projetada pelos modelos climáticos

	BESM	CANES	MIROC	ENSEMBLE
RCP 4.5 (2006-2099)	148.3	151.9	141.1	147.1
RCP 8.5 (2006-2099)	137.3	145.1	144.2	142.2

Figura 14 – Distribuição mensal das precipitações médias projetadas pelos modelos climáticos, entre os anos de 2006 e 2099, e precipitação média mensal observada, dos anos de 2006 e 2020.



As projeções climáticas de precipitação média mensal apontam para o aumento das precipitações médias mensais na BHRC, tanto no cenário RCP 4.5 (aumento médio de 17,12%) quanto RCP 8.5 (aumento médio de 13,23%). Esta tendência também foi observada por Steinmetz (2020) ao simular as projeções de clima futuro para uma bacia hidrográfica localizada no bioma Pampa. Estes resultados corroboram

com as estimativas do AR5 do IPCC (2013), onde elegem locais de clima úmido como propensos a registrar incrementos na precipitação no clima futuro.

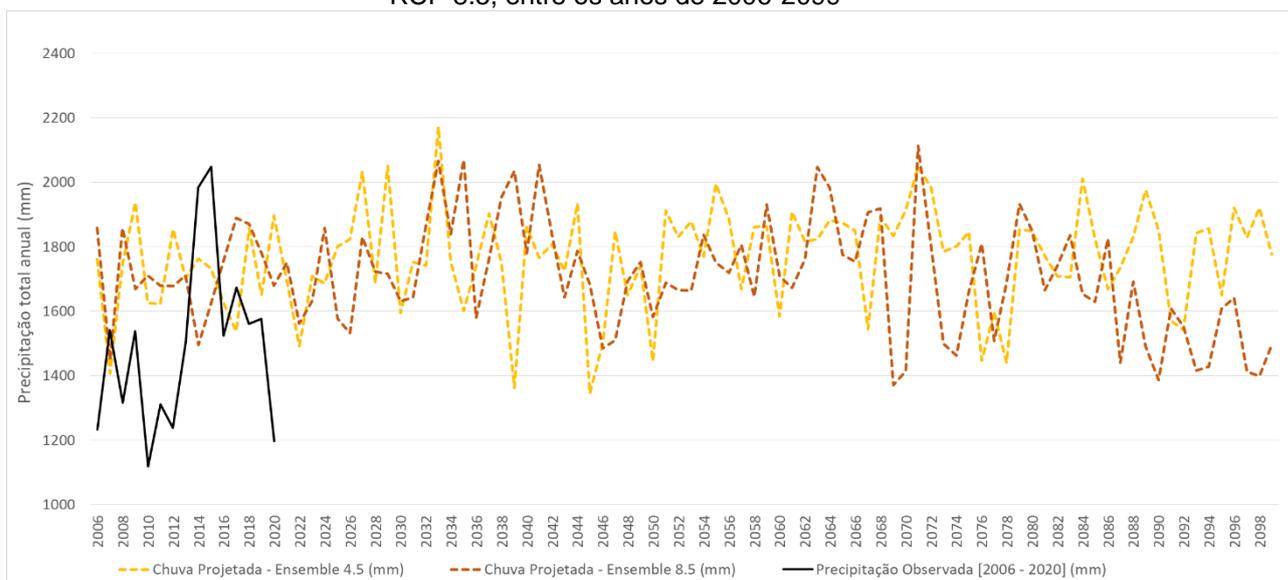
No RCP 4.5 o modelo BESM refletiu chuvas 19,35% maiores que as observadas, enquanto os modelos CANES e MIROC trazem aumentos de 22,26% e 13,53%, respectivamente. Para o cenário RCP 8.5 os aumentos foram de 10,53% (BESM), 16,77% (CANES) e 16,07% (MIROC).

Como pode ser constatado na Figura 14, quando avaliado o cenário RCP 4.5, o modelo CANES apresenta uma projeção de precipitação média mensal mais elevada que os demais modelos (média mensal de 151,9 mm), com exceção dos meses de abril a junho. Já o modelo MIROC apresenta uma tendência de chuvas mais brandas (média mensal de 141,1 mm) na projeção de clima futuro quando comparados aos demais modelos.

A projeção do RCP 8.5 apesar de indicar uma perspectiva de chuvas mais elevadas que as precipitação médias mensais observadas, tendem a reproduzir cenários com valores médios mensais inferiores ao RCP 4.5, a exceção do modelo MIROC que apresenta sútil aumento.

Na Figura 15 é apresentada a comparação das projeções futuras de precipitação total anual entre os anos de 2006-2099 para o média do conjunto de modelos (ensemble), dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Para fins comparativos, a precipitação total média observada entre os anos de 2006 e 2020 também consta no gráfico abaixo.

Figura 15 – Projeção de precipitação do conjunto de modelos climáticos, para os cenários RPC 4.5 e RCP 8.5, entre os anos de 2006-2099



Nota-se que as projeções de clima futuro indicam anos com acumulados de precipitação superiores aos já registrados, para ambos os cenários, a exceção dos anos de 2014 e 2015. A série temporal mostra que os modelos são coerentes e que tem comportamento, de modo geral, similares, tendo sido verificada discordância de tendência apenas quando analisadas as simulações do final do século.

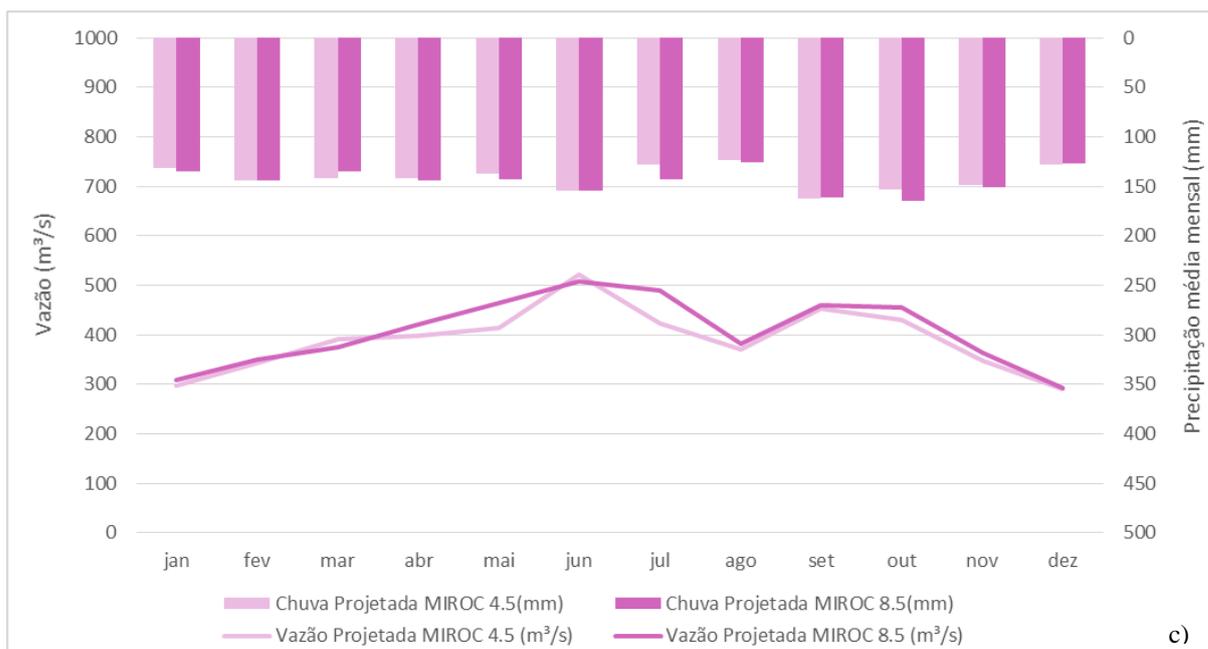
Para a década de 2020-2030 o RCP 4.5 indica totais anuais superiores à média histórica observada entre os anos de 1987 e 2005 (1507 mm), com estimativa de acúmulo de 262 mm acima dos valores médios. O ano de 2039 é o que mostra maior amplitude entre os dois cenários, 836 mm entre a média das projeções do RCP 4.5 e RCP 8.5.

Ademais, percebe-se que o RCP 8.5 indica uma redução da precipitação total para o final do século XXI, especialmente para a última década. Em oposição, o RCP 4.5 segue indicando chuvas acima dos valores observados e traz uma estimativa de aumento considerável dos totais acumulados para este mesmo período.

A simulação das vazões médias mensais frente aos dados de clima futuro projetados para cada modelo e ambos os cenários representativos de concentração, são expostas na Figura 16.

Figura 16 - Simulação das vazões médias mensais frente aos dados de clima futuro (2006-2099) projetados para os MCGs: a) BESM; b) CANES; c) MIROC





Observa-se que o modelo BESM traz em suas projeções a tendência de chuvas mais expressivas no RCP 4.5. Por consequência, as projeções de vazão também são superiores que as do RCP 8.5.

O modelo climático CANES não tem esse mesmo comportamento, visto que os cenários RCP 4.5 e 8.5 intercalam os meses com as maiores médias mensais. A vazão média mensal por sua vez tem valores maiores para o RCP 4.5 na maior parte dos meses.

Para o MIROC, como mostra a Figura 16 - c, as projeções de chuva média mensal não têm oscilação significativa entre os cenários de concentração. Logo as vazões mensais são praticamente as mesmas entre os RCPs 4.5 e 8.5.

Quando comparados os três modelos de MCGs regionalizados, simultaneamente, para cada RCP, pode-se estimar o comportamento médio (ensemble) das projeções de vazão média mensal e confrontar com os dados de clima futuro projetado com os resultados da calibração de vazão simulados entre os anos de 2006-2020. A Figura 17 apresenta essa análise.

Figura 17 - Distribuição mensal das vazões médias projetadas pelos modelos climáticos, entre os anos de 2006 e 2009, e vazão média mensal simulada na calibração do modelo hidrológico, entre os anos de 2006 e 2020 para a) RCP 4.5, b) RCP 8.5



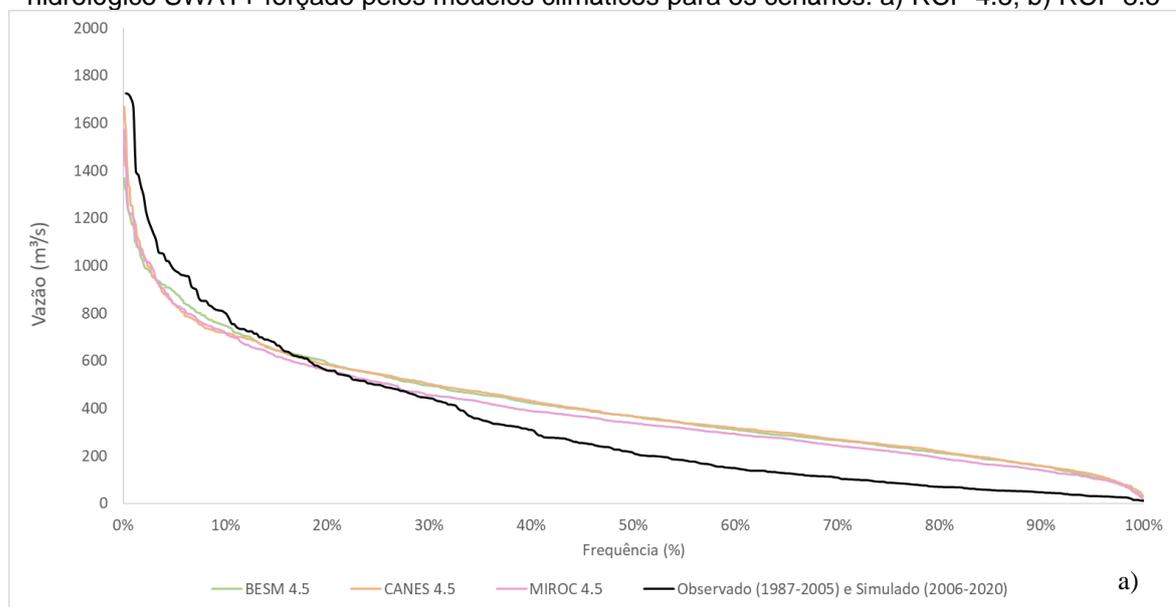
Verifica-se que no RCP 4.5 os modelos têm um comportamento similar ao longo dos meses, condizentes entre si. Contudo, divergem consideravelmente dos valores médios observados no período entre 2006-2020, para os meses do primeiro trimestre do ano. As projeções de vazão tendem a superestimar os valores médios observados, exceto nos meses julho, agosto e setembro. O cenário 8.5 também apresenta comportamento similar entre os modelos, porém com diferenças mais significativas entre as projeções mensais.

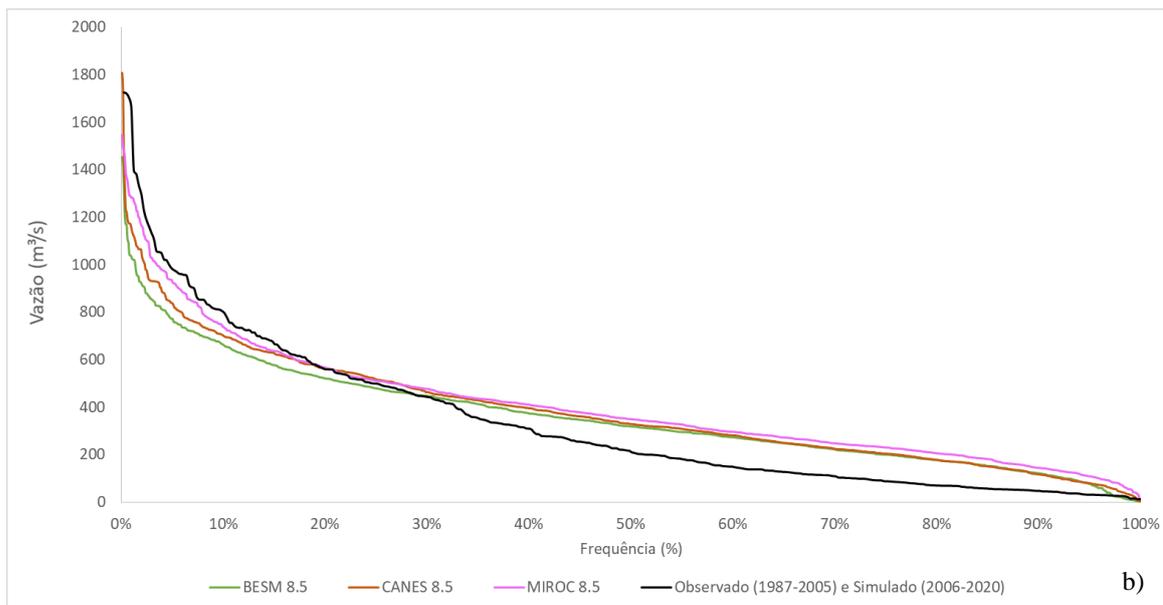
Cabe mencionar que o regime hidrológico da variação sazonal das vazões da BHRC, foi bem representado no modelo SWAT+ nos períodos úmidos e secos ao longo do ano. Logo, entende-se que as simulações forçadas pelos diferentes modelos

climáticos concordam entre si para os meses em que ocorrem vazões mais elevadas e tendem a divergir na tentativa de reproduzir vazões mais baixas. Esse comportamento pode ser atribuído as incertezas inerentes dos estudos de mudanças climáticas, que envolvem desde a concepção de estrutura de modelos MCG/MCR, os próprios cenários de emissão e aspectos relacionados a parametrização (Oliveira *et al.* 2019).

Na Figura 18 é apresentada a curva de permanência da BHRC simulada pelo SWAT+ forçado pelos modelos climáticos BESM, CANES e MIROC, para os RCPs 4.5 e 8.5.

Figura 18 – Curva de permanência de vazões médias mensais observadas e simuladas pelo modelo hidrológico SWAT+ forçado pelos modelos climáticos para os cenários: a) RCP 4.5; b) RCP 8.5





Em linha com os resultados apresentados anteriormente, a curva de permanência evidencia a superestimativa das vazões médias mensais projetadas, se comparado com os dados observados. Esta análise agrega a informação relativa a frequência em que este comportamento passa a ser imperativo.

Em ambos os cenários de RCP as vazões médias mensais passam a apresentar valores superiores aos observados a partir da frequência de 22% do tempo, o que corresponde a uma vazão média mensal igual ou inferior a 540 m³/s. Já para frequências menores, em cenários de maiores vazões, os modelos retornam estimativas de vazão subestimadas.

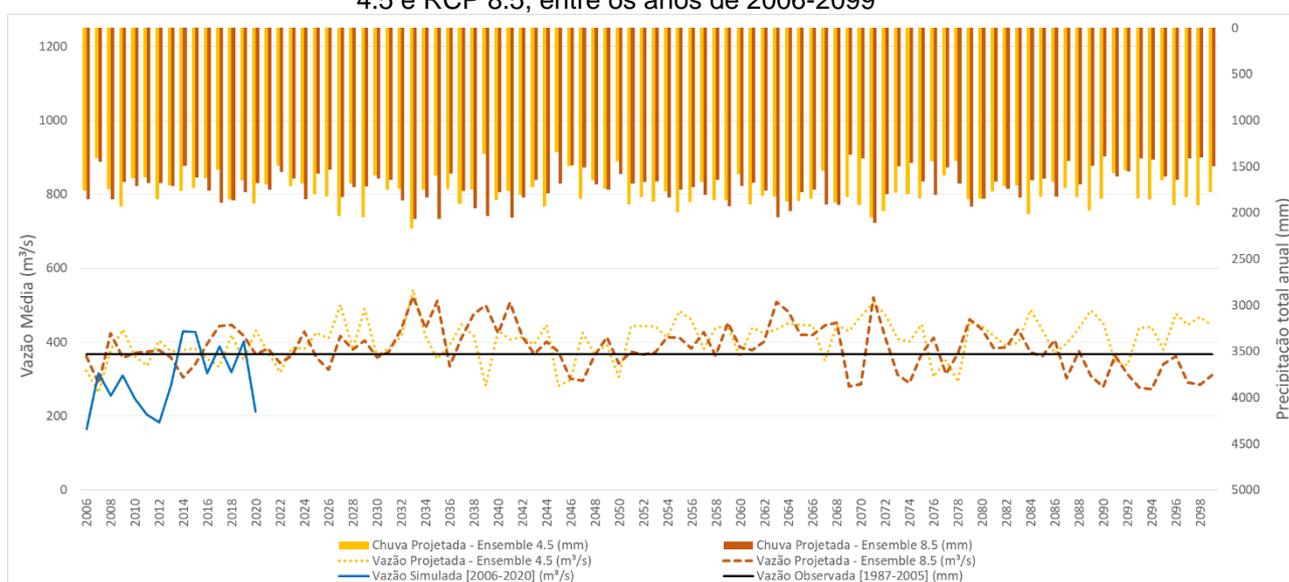
A partir dos resultados apresentados na Figura 19 nota-se que, no conjunto dos três modelos empregados neste estudo (ensemble), o cenário RCP 4.5 projeta vazões mais elevadas que a média observada entre os anos de 1987 a 2005, para a maior parte dos anos. Os recortes dos anos entre 2041-2070 e das três últimas décadas do século, anos entre 2071-2099, indicam a vazões média anuais 14% maiores que os valores médios anuais observados entre os anos de 1987 e 2005. As três primeiras décadas simuladas, entre 2006-2040, trazem um aumento das vazões médias anuais 7% maiores.

Já o cenário RCP 8.5 indica vazões mais elevadas para os dois primeiros horizontes simulados, entre 2006-2040 e entre 2041-2070, com projeções de vazões médias anuais 8% maiores que as observadas. Em tempo, é relevante apontar que a

média das últimas três décadas do século, anos entre 2071-2099, indicam a vazões médias anuais 3% menores que os valores médios anuais observados entre os anos de 1987 e 2005. Essa redução das vazões é explicada devido a diminuição da precipitação total anual média (Figura 15) simulada para este período.

O prognóstico de aumento nas vazões médias mensais no recorte dos períodos futuros, em comparação ao clima passado, indicam que o anos entre 2041-2070 tendem, para ambos os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, a registrar valores de vazão mais elevadas. Este resultado corrobora com as constatações obtidas por Caldeira (2019) e Steinmentz (2020).

Figura 19 - Projeção de vazão média anual do conjunto de modelos climáticos, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, entre os anos de 2006-2099



Conforme destacado pela ANA (2024), a região sul do Brasil apresenta uma tendência de aumento na disponibilidade hídrica, acompanhada por uma maior variabilidade temporal dos recursos hídricos. Essa crescente oscilação nas condições hidrológicas torna o cenário futuro mais imprevisível, exigindo estratégias de gestão mais flexíveis e adaptáveis para garantir o equilíbrio entre oferta e demanda de água na região.

7.4 Conclusão

Por meio do emprego do modelo hidrológico SWAT+ calibrado para a bacia hidrográfica do Rio Camaquã, foram realizadas as projeções de clima futuro para os modelos climáticos BESM, CANES e MIROC, e também dos dados de clima passado frente aos cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5.

A simulação do modelo hidrológico SWAT+ da BHRC forçado pelos modelos climáticos BESM, CANES e MIROC entre 1987-2005, representaram de forma satisfatória a dinâmica hidrológica da região, embora apresentem superestimações e subestimações sazonais.

As projeções climáticas (2006-2099) de precipitação média mensal apontam para o aumento das precipitações médias mensais, tanto no cenário RCP 4.5 quanto o RCP 8.5 apesar deste último indicar uma redução da precipitação para o final do século XXI, especialmente para a última década. O RCP 4.5 estima o aumento considerável dos totais acumulados para este mesmo período.

No período entre os anos de 2071-2099 ambos os cenários de emissão sugerem o aumento das vazões médias anuais, se comparada com as observadas entre os anos de 1987 a 2005. O cenário RCP 4.5 projeta o aumento de 14% enquanto o RCP 8.5 indica vazões 8% maiores.

As maiores divergências entre os cenários se concentram na estimativa das vazões médias anuais das últimas três décadas do século, anos entre 2071-2099. O RCP 8.5 indica a redução em 3% das vazões médias anuais em relação aos valores históricos médios anuais observados, enquanto o RCP projeta aumento de 14%.

Em ambos os cenários de RCP as vazões médias mensais passam a apresentar valores superiores aos observados para vazões médias mensais iguais ou menores que 540 m³/s. Já para as vazões mais elevadas que este patamar, os modelos retornam estimativas de vazão subestimadas.

As tendências identificadas corroboram estudos anteriores no bioma Pampa, reforçando que as projeções climáticas devem ser interpretadas considerando as incertezas inerentes aos modelos e às condições locais. A compreensão desses padrões é essencial para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, particularmente no contexto das mudanças climáticas e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica da região.

Dessa forma, conclui-se que os resultados obtidos atingem o objetivo do estudo, fornecendo informações relevantes sobre a disponibilidade futura dos recursos hídricos na BHRC e suas implicações para a gestão hídrica da região. O modelo SWAT+ demonstrou ser uma ferramenta eficaz na simulação hidrológica e nas projeções climáticas, permitindo a análise de diferentes cenários e auxiliando na tomada de decisão para políticas de adaptação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Assim, este estudo contribui para o aprimoramento da gestão dos recursos hídricos no bioma Pampa, servindo como instrumento técnico-científico para subsidiar ações estratégicas e políticas públicas voltadas à sustentabilidade hídrica e à segurança hídrica da bacia.

7.5 Referências

ALVARENGA, L. *et al.* Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, v. 7, n. 02, p. 355, 2018.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, J.; GONÇALVES, T.; NASCIMENTO, S. A. Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil: tendências e variabilidade (1970-2020). **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, v. 17, n. 2, p. 527-542, 2022

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Catálogo de Metadados ANA**. Rede Hidrometeorológica Nacional. Brasília, SNIRH, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156>. Acesso em 28 set. 2020.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil** - Sumário Executivo. Brasília: ANA, 2024.

ANA, Agência Nacional da Águas e Saneamento Básico. **Monitor de Secas**. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=12&ano=2020>. Acesso em 25 out. 2024.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Portal HidroWeb**. Disponível: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 28 set. 2020.

ARNOLD, J. G. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARORA, V. *et al.* Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-6, 2011.

BERVOETS, J. *et al.* Strengthening the Water-FoodEnergy-Ecosystems (WFEE) Nexus. **FAO**. 2018. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c2c0bdee-6c8e-4740-a635-178ff4bb786d/content> Acesso em 17 nov. 2024.

BESKOW, S. *et al.* Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. Cap. 1, p. 6-12.

BIEGER, K. *et al.* Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 1, p. 115-130, 2017.

BRESSIANI, D. *et al.* Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **Int J Agric & Biol Eng**, v. 8, n. 3, p. 125–139, 2015.

CALDEIRA, T. L. **Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo**. 2019. 240f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

CIGANA, C. **Seca atual já supera a de 2005 no Rio Grande do Sul**. Gaúcha GZH. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2012/01/seca-atual-ja-supera-a-de-2005-no-rio-grande-do-sul-3631660.html>. Acesso em 25 out. 2024

CHOU, S. *et al.* Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 635-653, 2012.

CNN BRASIL. **Alagamentos, destruição e 183 mortes: relembre a tragédia das chuvas no RS que marcou 2024**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sul/rs/alagamentos-destruicao-e-183-mortes-relembre-a-tragedia-das-chuvas-no-rs-que-marcou-2024/>. Acesso em 22 dez. 2024

CUARTAS, L.A. *et al.* Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. **Water**, v. 14, n. 4, 601-618, 2022.

DOLL, P. *et al.* Modelling freshwater resources at the global scale: Challenges and prospects. **Surveys in Geophysics**, v. 37, n. 2, p. 195-221, 2016.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro, v. 5, 2018.

FAVERO, D. **RS: Defesa Civil projeta uma das piores secas desde 2000**. Terra. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/rs-defesa-civil-projeta-uma-das-piores-secas-desde-2000,741a97730cbda310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>. Acesso em 25 out. 2024

GAMA, Engenharia e Recursos Hídricos. **PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CAMAQUÃ: Relatório Executivo 2015 I 2035**. Relatório Final. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2016.

GIORGI, F.; JONES, C.; ASRAR, G. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. **World Meteorological Organization (WMO) Bulletin**, v. 58, n. 3, p. 175, 2009.

HOFMANN, G.S. *et al.* **Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2015**. Porto Alegre: UFRGS IB Centro de Ecologia, 2015. 1a ed. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/labgeo>. Acessado em 28 set. 2023

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. **Sci. Adv.**, e1500323 <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>.

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **5ª Conferência Nacional do Meio Ambiente**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/gm/5a-CNMA>. Acesso em 18 dez. 2024.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NEITSCH, S. L. *et al.* Overview of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model. In: **SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT): GLOBAL APPLICATIONS**. 4. ed. Bangkok: World Association Of Soil And Water Conservation, 2009. p. 3-24.

NETO, A. *et al.* Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 12, p. 1103, 2016.

NOBRE, P. *et al.* Climate Simulations and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, 2013.

OLIVEIRA, C. M. M. *et al.* Projeção dos Eventos de Seca Meteorológica e Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Verde. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 39, p. e39240059, 2024.

OLIVEIRA, V. *et al.* Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

OLIVEIRA, V. *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20-31, 2019.

PARAGUASSU, L. **Rio Grande do Sul: entre secas e inundações, estado vive eventos extremos com sinais de mudanças climáticas**. CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/rio-grande-do-sul-entre-secas-e-inundacoes-estado-vive-eventos-extremos-com-sinais-de-mudancas-climaticas/>. Acesso em 12 dez. 2024.

SAN JOSÉ, R. *et al.* Impacts of the 4.5 and 8.5 RCP global climate scenarios on urban meteorology and air quality: Application to Madrid, Antwerp, Milan, Helsinki and London. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 293, p. 192-207, 2016.

SANTOS, C. *et al.* Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil. **Water**, v. 11, n. 1, p. 170, 2019.
SARKAR, D. *et al.* Compiling non-parametric tests along with CA-ANN model for precipitation. **Water Cycle**, v. 2, p. 71-84, 2021.

SCAGLIONI, T. P.; *et al.* (2023). Oscilações climáticas e a relação com os eventos extremos de precipitação na bacia hidrográfica do Camaquã/RS. **Revista Brasileira De Climatologia**, 33(19), 260–277. <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16649>

SILVA, V. O. **Evaluating and projecting extreme meteorological droughts over two strategic regions of Brazil: the Brazilian Pantanal and Southern Minas Gerais**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras.

SIQUEIRA, P. P. *et al.* Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, 2021.

STEINMETZ, A. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias hidrográficas do Pampa brasileiro**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pelotas.

TAYE, M.T. *et al.* Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 280-293, 2015.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. **Water Resources Research**, v. 43, n. 1, 2007.

USGS, U.S. Geological Survey. **Shuttle Radar Topography Mission**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

WATANABE, M. *et al.* Improve Climate Simulation by ETA-MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312-6335, 2010.

ZAMANI, M. *et al.* Advancing model calibration and uncertainty analysis of SWAT models using cloud computing infrastructure: LCC-SWAT. **Journal of Hydroinformatics**, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2021.

ZHANG, X.; XU, Y.; FU, G. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 515, p. 205-222, 2014.

8 Considerações Finais

A modelagem hidrológica realizada neste estudo, por meio do SWAT+, demonstrou ser uma ferramenta essencial para a compreensão da dinâmica hídrica da bacia hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC) e suas interações com as projeções climáticas futuras. A calibração e validação do modelo atestaram sua capacidade de representar, com fidelidade satisfatória, os padrões hidrológicos da região, apesar das variações sazonais observadas nas estimativas de vazão. A análise das projeções de precipitação e vazão sob os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5 revelou tendências de aumento das vazões médias anuais ao longo do século XXI, ainda que com diferenças significativas na distribuição temporal e espacial desses incrementos, particularmente nas últimas décadas do período estudado. Essas tendências reforçam a importância da adoção de estratégias de adaptação para mitigar os impactos de eventos extremos, como inundações e estiagens prolongadas, que podem comprometer a segurança hídrica da região.

Ao validar a aplicabilidade do SWAT+ para a modelagem hidrológica da BHRC, este estudo não apenas contribui para o aprimoramento do conhecimento sobre os padrões hidrológicos do bioma Pampa, mas também se posiciona como uma referência técnica para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos recursos hídricos. A capacidade do modelo de simular diferentes cenários climáticos permite uma avaliação mais precisa dos riscos associados às mudanças na disponibilidade hídrica, fornecendo subsídios científicos para a definição de estratégias de gestão integrada da água. A relevância desses resultados se estende para além do contexto local, podendo servir de base para estudos similares em outras regiões com características hidrológicas e climáticas comparáveis.

Dessa forma, este estudo evidencia a necessidade de incorporar modelos hidrológicos avançados e projeções climáticas detalhadas no processo de tomada de decisão sobre o uso da água, especialmente diante das incertezas impostas pelas mudanças climáticas e do próprio modelo, que neste estudo não foi avaliado devido a indisponibilidade desta análise na ferramenta SWAT+ Toolbox. A adoção de políticas que considerem cenários hidrológicos futuros torna-se imperativa para garantir a resiliência das atividades econômicas e ecológicas dependentes da água, bem como para fortalecer a capacidade adaptativa das comunidades da BHRC. Assim, os

resultados apresentados aqui não apenas contribuem para a ciência hidrológica, mas também desempenham um papel estratégico na construção de uma gestão hídrica mais eficiente, sustentável e voltada à redução dos impactos adversos das variações climáticas no bioma Pampa.

Referências

AGEFLOR, Associação Gaúcha de Empresas Florestais. **O Setor de Base Florestal no Rio Grande Do Sul – 2022**. Disponível em <http://www.ageflor.com.br/noticias/wp-content/uploads/2022/12/ANUARIO-AGEFLOR-2022-WEB.pdf>

ALVARENGA, L. *et al.* Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, v. 7, n. 02, p. 355, 2018.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, J.; GONÇALVES, T.; NASCIMENTO, S. A. Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil: tendências e variabilidade (1970-2020). **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, v. 17, n. 2, p. 527-542, 2022

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Catálogo de Metadados ANA**. Rede Hidrometeorológica Nacional. Brasília, SNIRH, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156>. Acesso em 28 set. 2020.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil** - Sumário Executivo. Brasília: ANA, 2024.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Portal HidroWeb**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 28 set. 2020.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Monitor de Secas**. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=12&ano=2020>. Acesso em 25 out. 2024.

ARNOLD, J. G. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012**. Texas: Texas Water Resources Institute, 2012a. TRF-439.

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

ARNOLD, J. G. *et al.* Automated base flow separation and recession analysis techniques. **Groundwater**, v. 33, n. 6, p. 1010-1018, 1995.

ARNOLD, J. G. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARNOLD, J. G. *et al.* Use of decision tables to simulate management in SWAT+. **Water**, v. 10, n. 6, p. 713, 2018.

ARORA, V. *et al.* Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-6, 2011.

BAJRACHARYA, A. *et al.* Time Variant sensitivity analysis of hydrological model parameters in a cold region using flow signatures. **Water**, v. 12, n. 4, p. 961, 2020.

BALAJI, N.; DHANESH, Y. **Excel template calculates SWAT soil parameters using the Pedo Transfer Function (PTF)**. Comunicação Pessoal. 2011.

BEIER, E. V.; POLETO, C.; FERREIRA, M. E. M. C. Natural characterization of the low course of the Camaquã River in Cristal city-RS. **Revista eletrônica em gestão e tecnologia ambiental. Santa Maria, RS**, 2019.

BEIER, E. V.; POLETO, C.; FERREIRA, M. E. M. C. Processos antrópicos e a caracterização do baixo de curso do Rio Camaquã no município de Cristal-RS. **Encontro Regional de Geografia** (4.: 2018 out.: Maringá, PR). Anais. Maringá-Paraná: Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Geografia, 2018, 2018.

BERVOETS, J. *et al.* Strengthening the Water-FoodEnergy-Ecosystems (WFEE) Nexus. **FAO**. 2018. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c2c0bdee-6c8e-4740-a635-178ff4bb786d/content> Acesso em 17 nov. 2024.

BESKOW, S., MELLO, C.R., NORTON, L.D., SILVA, A.M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v. 86, n. 3, p. 160-171, 2011.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resources Management**, v. 27, p. 341-363, 2013.

BESKOW, S. *et al.* Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. Cap. 1, p. 6-12.

BESKOW, S. *et al.* Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, Southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, p. 2567-2578, 2016. DOI: 10.1080/02626667.2015.1133912.

BEVEN, K. How far can we go in distributed hydrological modelling?. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2001.

BEZERRA, J. F. **Solo: substrato da vida**. EMBRAPA Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, 2006.

BIEGER, K. *et al.* Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 1, p. 115-130, 2017.

BIEGER, K. *et al.* Representing the connectivity of upland areas to floodplains and streams in SWAT+. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 55, n. 3, p. 578-590, 2019.

BIOSRAMÉ, G. **WGN Excel Macro for SWAT**. 2011. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/software/>

BRANDÃO, L. O. A. **Utilização do modelo SWAT para análise de respostas hidrológicas em diferentes cenários na Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu-Bahia**. 2024. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: Presidência da República, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em 15 out. 2020.

BRESSIANI, D. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRESSIANI, D. *et al.* Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **Int J Agric & Biol Eng**, v. 8, n. 3, p. 125–139, 2015b.

BRESSIANI, D. A. **Planilha para cálculo de Radiação Solar, com base na Insolação**. Comunicação Pessoal. 2012.

BRESSIANI, D. *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, 2015a.

BRESSIANI, D. A.; ROTAVA, J. **Scripts em Python para Processamento de Dados de Precipitação e Interpolação para o formato do Soil & Water Assessment Tool**. 2020. Acessado em 15 de jul. 2020. Disponível: <https://github.com/SWAT-Brasil/util/>

CALDEIRA, T. L. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas, 2016.

CALDEIRA, T. L. *et al.* LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena**, v. 173, p. 183-193, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.10.009

CALDEIRA, T. L. **Modelagem do impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim-São Gonçalo**. 2019. 240f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

CALDEIRA, T. L. *et al.* Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: Uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 22-32, 2018.

CAMPOS, F. L. M. *et al.* Modelagem hidrológica da bacia do Rio Iconha-ES: potencialidades, desafios e soluções para pequenas bacias hidrográficas. **Geoconexões**, v. 3, n. 20, p. 78-104, 2024a.

CAMPOS, F. L. M. *et al.* Uso do modelo hidrológico SWAT+ para quantificação e espacialização de processos em apoio ao planejamento ambiental. **Revista Pantaneira**, v. 24, p. 119-137, 2024b.

CARVALHO, F. H. **USO DO MODELO SWAT NA ESTIMATIVA DA VAZÃO E DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA AGRÍCOLA DO CERRADO BRASILEIRO**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CIGANA, C. **Seca atual já supera a de 2005 no Rio Grande do Sul**. Gaúcha GZH. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2012/01/seca-atual-ja-supera-a-de-2005-no-rio-grande-do-sul-3631660.html>. Acesso em 25 out. 2024

CHAWANDA, C. J. **SWAT+ Toolbox v1.0**: documentation. Documentation. 2023. Disponível em: <https://celray.github.io/docs/swatplus-toolbox/v1.0/index.html>. Acesso em: 02 abr. 2023.

CHOU, S. *et al.* Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 635-653, 2012.

CNN BRASIL. **Alagamentos, destruição e 183 mortes: relembre a tragédia das chuvas no RS que marcou 2024**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sul/rs/alagamentos-destruicao-e-183-mortes-relembre-a-tragedia-das-chuvas-no-rs-que-marcou-2024/>. Acesso em 22 dez. 2024

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: Coleção ABRH, 2015. 336 p.

CONEJO, J.G. L. *et al.* **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. In: Cadernos de Recursos Hídricos. Brasília: ANA. 2005.

CUARTAS, L.A. *et al.* Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. **Water**, v. 14, n. 4, 601-618, 2022.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudo de solos do Município de Barra do Quaraí - RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2001.84p. Circular Técnica, 30.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de Caiçara - RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 28p. Circular Técnica, 103.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de Camaquã- RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000. 98p. Circular Técnica, 18.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de Encruzilhada do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 83p. Circular Técnica, 45.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudo dos Solos do Município de Pinheiro Machado**. Pelotas: Embrapa -CPACT, 1998. 79p. Documentos, 45.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudo dos Solos do Município de Piratini**. Pelotas: Embrapa-CPACT; Ed. UFPel, 1997. 90 p. Documentos, 26/97.

CUNHA, N. G *et al.* **Estudos de Solos do Município de São Lourenço do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 47p. Circular Técnica, 52.

CUNHA, N. G *et al.* **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 43p. Circular Técnica, 55.

DE ROO, A. P. J. *et al.* A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. **Hydrological Processes**, v. 10, n. 8, p. 1107-1117, 1996. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4

DEVAK, M.; DHANYA, C. T. Sensitivity analysis of hydrological models: review and way forward. **Journal of Water and Climate Change**, v. 8, n. 4, p. 557-575, 2017.

DOLL, P. *et al.* Modelling freshwater resources at the global scale: Challenges and prospects. **Surveys in Geophysics**, v. 37, n. 2, p. 195-221, 2016.

DOS SANTOS, F. M. *et al.* Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. **Catena**, v. 222, p. 106872, 2023.

DOTTO, A. V. E. **Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari-RS**. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro, v. 5, 2018.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**: Rio de Janeiro, v. 5, 2018.

ESTRADA, V.; DÍAZ, M. S. Global sensitivity analysis in the development of first principle-based eutrophication models. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 12, p. 1539-1551, 2010.

FARIAS, A.; MENDONÇA, F. Riscos socioambientais de inundação urbana sob a perspectiva do Sistema Ambiental Urbano. **Sociedade & natureza**, v. 34, p. e63717, 2022.

FARIAS, C. W. L. A. *et al.* Técnica de calibração para modelagem da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1621-1628, 2023.

FAVERO, D. **RS: Defesa Civil projeta uma das piores secas desde 2000**. Terra. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/rs-defesa-civil-projeta-uma-das-piores-secas-desde-2000,741a97730cbda310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>. Acesso em 25 out. 2024

FERREIRA, F. M. *et al.* Climate change in the Upper Paraguay Basin and hydrological impacts on the Pantanal. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 7, p. 3210-3221, 2024.

FERREIRA, P. S. **Modelagem Hidrológica para Estimativa da Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida e a Disponibilidade Hídrica Frente às Mudanças Climáticas**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

FUKUNAGA, D. C. *et al.* Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

GAMA, Engenharia e Recursos Hídricos. **PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CAMAQUÃ: Relatório Executivo 2015 I 2035**. Relatório Final. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2016.

GAMA, Engenharia e Recursos Hídricos. **RT3 – Diagnóstico da bacia**. Serviços de Consultoria Relativo ao Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Camaquã Fases A, B e C Relatório Final. 2015.

GARNA, R. K. *et al.* Watershed model parameter estimation in low data environments. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 45, p. 101306, 2023.

GASSMAN, Philip W. *et al.* The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GIORGI, F.; JONES, C.; ASRAR, G. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. **World Meteorological Organization (WMO) Bulletin**, v. 58, n. 3, p. 175, 2009.

GOUDARZI, F. M.; SARRAF, A.; AHMADI, H. Calibration of SWAT and three data-driven models for monthly stream flow simulation in Maharlu Lake Basin. **Water Supply**, v. 21, n. 8, p. 4219-4238, 2021.

GULL, S.; SHAH, S. R. Watershed models for assessment of hydrological behavior of the catchments: a comparative study. **Water Practice and Technology**. v. 15, n. 2, p. 261-281, 2020.
doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.030>

GUPTA, A.; GOVINDARAJU, R. S. Propagation of structural uncertainty in watershed hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 66-81, 2019.

HAO, F. *et al.* Coupling the Xinanjiang model with geomorphologic instantaneous unit hydrograph for flood forecasting in northeast China. **International Soil and Water Conservation Research**, v.3, p. 66-76, 2015.

HARIFIDY, R. Z. *et al.* Multi-gauge calibration comparison for simulating streamflow across the Major River Basins in Madagascar: SWAT+ Toolbox, R-SWAT, and SWAT+ Editor Hard calibration. **Hydrology Research**, v. 55, n. 3, p. 412-430, 2024.

HGE, Hidrologia de Grande Escala. **Publicações**. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/publicacoes/>. Acesso em: 23 set. 2023

HOFMANN, G.S. *et al.* **Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2015**. Porto Alegre: UFRGS IB Centro de Ecologia, 2015. 1a ed. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/labgeo>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário, Florestal e Agrícola 2017**. 2017. Acessado em 16 jul. 2021. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

JOVINO, E. S. *et al.* Impacts of land use and land cover on sediment production in a tropical peri-urban water source area. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p. e64640, 2022.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* Comparative hydrology: relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 6, p. 1187-1195, 2014.

LOPES, V. A. R. **Modelagem hidrológica integrada da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos e seus complexos lagunares usando o modelo MGB-IPH com propagação inercial de vazões**. 2015. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES, V. A. R. *et al.* A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal of hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.011.

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. **Sci. Adv.**, e1500323 <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>.

MELLO, C. R. SILVA, A. M. BESKOW, S. **Hidrologia de superfície: princípios e aplicações**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2020. 531p

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

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **5ª Conferência Nacional do Meio Ambiente**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/gm/5a-CNMA>. Acesso em 18 dez. 2024.

MOGES, E. *et al.* Review: Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. **Water** 13 (1), 28. 2020.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOSER, C. L.; KROCZYNSKI, C.; HLYWIAK, K. Comparison of the SAC-SMA and API-CONT hydrologic models at several Susquehanna River headwater basins. United States: National Weather Service, 2013. **Eastern Region Technical Attachment**, n. 2013-0. Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/6634>. Acesso em: 13 fev. 2023.

NEITSCH, S. L. *et al.* Overview of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model. In: **SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT): GLOBAL APPLICATIONS**. 4. ed. Bangkok: World Association Of Soil And Water Conservation, 2009. p. 3-24.

NETO, A. *et al.* Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 12, p. 1103, 2016.

NETO, J. O. M. *et al.* Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014.

NOBRE, P. *et al.* Climate Simulations and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, 2013.

NOSSENT, J.; ELSEN, P.; BAUWENS, W. Sobol'sensitivity analysis of a complex environmental model. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1515-1525, 2011.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **National Weather Service NWS - NOAA**. Disponível em: https://www.weather.gov/owp/oh_hrl_hsm_b_hydrology_PBE_SAC-SMA. Acesso em: 28 set. 2021

OLIVEIRA, C. M. M. *et al.* Projeção dos Eventos de Seca Meteorológica e Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Verde. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 39, p. e39240059, 2024.

OLIVEIRA, L. T. *et al.* Hydrological simulation of a small forested catchment under different land use and forest management. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 13, n. 4, p. 301, 2020.

OLIVEIRA, V. *et al.* Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

OLIVEIRA, V. *et al.* Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20-31, 2019.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Generalização do Modelo SMAP/ONS para Previsão de Vazões no âmbito do SIN**. 2018. Acesso em 21 de jul. 2022. Disponível: <https://encurtador.com.br/E11UK>

ORTH, R. *et al.* Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 147-159, 2015.

PBMC, 2016: Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p.

PARAGUASSU, L. **Rio Grande do Sul: entre secas e inundações, estado vive eventos extremos com sinais de mudanças climáticas**. CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/rio-grande-do-sul-entre-secas-e-inundacoes-estado-vive-eventos-extremos-com-sinais-de-mudancas-climaticas/>. Acesso em 12 dez. 2024.

PEDROLLO, O. C.; LANNA, A. E. L. Previsão de cheias em tempo atual com sistema especialista difuso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS: ABRH. Vol. 8, n. 1, p. 45-60, 2003.

PEREIRA, D. R. *et al.* Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p. 789-799, 2014.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica. **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 33.

SAN JOSÉ, R. *et al.* Impacts of the 4.5 and 8.5 RCP global climate scenarios on urban meteorology and air quality: Application to Madrid, Antwerp, Milan, Helsinki and London. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 293, p. 192-207, 2016.

SANTOS, C. *et al.* Using a hierarchical approach to calibrate SWAT and predict the semi-arid hydrologic regime of northeastern Brazil. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1137, 2018.

SANTOS, C. *et al.* Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil. **Water**, v. 11, n. 1, p. 170, 2019.

SANTOS, F. M.; OLIVEIRA, R. P.; MAUAD, F. F. Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 29, p. 100685, 2020.

SARKAR, D. *et al.* Compiling non-parametric tests along with CA-ANN model for precipitation. **Water Cycle**, v. 2, p. 71-84, 2021.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; 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.

SCAGLIONI, T. P.; *et al.* (2023). Oscilações climáticas e a relação com os eventos extremos de precipitação na bacia hidrográfica do Camaquã/RS. **Revista Brasileira De Climatologia**, 33(19), 260–277. <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16649>

SCOPEL, C. SWAT: Soil & Water Assessment Tool. **Water**. 2012. Acesso em 30 nov. 2020. Disponível em: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/water/swat-soil-water-assessment-tool/>

SEMA, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **L030 - Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã**. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/l030-bh-rio-camaqua>. Acesso em: 01 mar. 2021.

SILVA, M. P. **Monitoramento e modelagem hidrológica sub-horária no bioma Pampa: nanobacia na estação experimental na UFSM**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

SILVA, T. P. *al.* Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production. **International soil and water conservation research**, v. 12, n. 1, p. 121-136, 2024.

SILVA, T. P. *et al.* Evaluating hydrological and soil erosion processes in different time scales and land uses in southern Brazilian paired watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 10, p. 1391-1408, 2023.

SILVA, V. O. **Evaluating and projecting extreme meteorological droughts over two strategic regions of Brazil: the Brazilian Pantanal and Southern Minas Gerais**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras.

SIQUEIRA, P. P. *et al.* Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, 2021.

SOUSA JUNIOR, M. F. de *et al.* Modelo Hidrológico Sacramento: Calibração e Avaliação do Desempenho na Estimativa de Vazões de uma Bacia da Região Amazônica. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Sbrh, 2017. p. 1-8.

STEINMETZ, A. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre as vazões em bacias hidrográficas do Pampa brasileiro**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pelotas.

SWAT, Soil & Water Assessment Tool. **Software & Data Tools**. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/>. Acesso em: 23 set. 2020

TAPAS, M. R. *et al.* Evaluating combinations of rainfall datasets and optimization techniques for improved hydrological predictions using the SWAT+ model. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 57, p. 102134, 2025.

TAYE, M.T. *et al.* Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 280-293, 2015.

TEGEGNE, G. *et al.* Hydrological modelling uncertainty analysis for different flow quantiles: a case study in two hydro-geographically different watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 4, p. 473-489, 2019.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. **Water Resources Research**, v. 43, n. 1, 2007.

TRENTIN, R.; LAURENT, F.; DE SOUZA, L. Vazão e balanço hídrico relacionado a mudanças no uso da terra em uma bacia hidrográfica de médio porte no bioma Pampa do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 873, 2023.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 669 p. 2005.

TUCCI, C. E. M. *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicações**. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009.

ULIANA, E. M. *et al.* Application of SAC-SMA and IPH II hydrological models in the Teles Pires River basin, Brazil. **RBRH**, v. 24, p. e15, 2019.

USGS, U.S. Geological Survey. **Shuttle Radar Topography Mission**. Acessado em 28 set. 2020. Disponível em: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

VARGAS, M. M. **Concepção do modelo hidrológico LASH em MATLAB®: aprimoramento da propagação em rios e da calibração**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

VARGAS, M. M. *et al.* M-LASH: hydrological and computational enhancements of the LASH model. **Environmental Modelling & Software**, v. 167, p. 105774, 2023.

VARGAS, M. M. *et al.* SYHDA – System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, p. 1, 2019.

VEITH, T. L. *et al.* Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 5, p. 1477-1486, 2010.

VIOLA, M. R. *et al.* Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.581-590, 2009.

WAGENA, M. B. *et al.* Quantifying model uncertainty using Bayesian multi-model ensembles. **Environmental Modelling & Software**, v. 117, p. 89-99, 2019.

WATANABE, M. *et al.* Improve Climate Simulation by ETA-MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312-6335, 2010.

XU, J. *et al.* Sobol'sensitivity analysis of parameters in the common land model for simulation of water and energy fluxes. **Earth Science Informatics**, v. 5, p. 167-179, 2012.

ZAMANI, M. *et al.* Advancing model calibration and uncertainty analysis of SWAT models using cloud computing infrastructure: LCC-SWAT. **Journal of Hydroinformatics**, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2021.

ZHAN, C. *et al.* An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters. **Environmental Modelling & Software**, v. 41, p. 39-52, 2013.

ZHANG, X.; XU, Y.; FU, G. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 515, p. 205-222, 2014.