

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS LONDRINA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

Julio Cesar Angelo Borges

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA MICROBACIA DO
RIO SANTA RITA - SP - BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA
2021**

Julio Cesar Angelo Borges

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA MICROBACIA
DO RIO SANTA RITA - SP - BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista

Coorientadora: Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira

**LONDRINA
2021**



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA MICROBACIA DO RIO SANTA RITA - SP - BRASIL

por

Julio Cesar Angelo Borges

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 12 de maio de 2021 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Ajadir Fazolo
(UTFPR)

Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi
(UTFPR)

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Orlando de Carvalho Junior
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, Cleusa e Claudemir, que propiciaram todos os meios para esta jornada, mesmo durante todos os momentos de dificuldades vividos. A meus avós, Luiz e Maria, que contribuíram também para que este momento fosse realizado. Agradeço-os pelos conselhos, pelos esforços e pelo apoio.

Aos amigos que fiz nestes anos de alegrias e tristezas, calma e desespero (sendo realista, mais desespero que calma) onde buscávamos aprender, crescer e evoluir como pessoas e como cidadãos. Para evitar possíveis reclamações do tipo “por que o nome de fulano veio primeiro?” vou seguir estes agradecimentos em ordem cronológica.

Ellen, Julia e Mark, meus primeiros contatos nos primeiros dias de aula, amigos que carrego comigo até os dias atuais (espero que para a vida). Mark, com quem tive o prazer conviver diariamente, agradeço profundamente pela amizade, pelas conversas aleatórias até altas horas da madrugada e pelas “saídas agradáveis”. Ellen, que juntamente com a Julia e Eu fomos apelidados de irmãos, apenas por passarmos muito tempo juntos, obrigado pelas risadas, pelo companheirismo, pelas refeições e bolos feitos pela dona Márcia, obrigado por sempre me receber em sua casa, obrigado pelos “rolês”. Julia, nossa blogueirinha, obrigado pela convivência diária, pelos banhos de irrigador, pela sujeira nas unhas e no jaleco que tive que jogar fora. Obrigado ainda por as vezes, bem as vezes sair com a gente para os “rolês”.

Não esqueci de vocês não, Tamara e Thiago, pelas risadas, horas de estudos, festas e almoços naquela casa cheia de cachorros, onde a Nina era rainha. Obrigado por me arrastar para os lugares, pelo pastel com areia, pela amizade verdadeira.

Ao Matheus pelas idas e vindas de Londrina, pelos “rolês” para ir comer, por toda ajuda nestes anos e em especial pela paciência. Aline e Jéssica, as vizinhas das caronas, dos churrasquinhos, dos perrengues com QGIS, obrigado pela animação de vocês.

Mi, muito obrigado por me acolher como seu IC, pelos anos de experiência, por me mostrar a pesquisa, pelas conversas e caronas com muitas risadas, pelas confraternizações com seus escravinhos, pelas idas a bar, precisamos continuar. Por fim, mas não menos importante, a professora Lígia, que foi paciente ao longo da construção desse trabalho, espero poder continuar essa parceria, obrigado por me apresentar o mundo do geoprocessamento que me ganhou. Obrigado a todos 🙏 .

*"Não haverá borboletas se a vida não passar
por longas e silenciosas metamorfoses".*

Rubem Alves

RESUMO

BORGES, J. C. A. **Modelagem e simulação hidrológica na microbacia do rio Santa Rita - SP - Brasil**. 2021. 65 p. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Devido a demanda crescente por recursos hídricos, as mais variadas ferramentas de gestão passam a ganhar importância, entre elas a modelagem ambiental por meio de softwares de predição, como o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Este trabalho visa obter um modelo espaço-temporal capaz de simular a vazão da microbacia do rio Santa Rita, localizados entres os municípios de Embu-Guaçu, Juquitiba e São Lourenço da Serra, na Região Metropolitana de São Paulo. Para isso se faz necessária uma caracterização da área de estudo, abrangendo dados físicos como topografia, pedologia, uso e ocupação do solo, além de dados climatológicos de precipitação, ventos, umidade, temperatura e radiação solar. Este estudo foi segmentado em 3 etapas: 1- obtenção e preparação dos dados de entrada; 2 – pré-processamento, onde foram determinadas as Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU); e 3 – processamento, realizando calibração, validação e simulação. Os dados simulados foram comparados com dados observados em uma estação de monitoramento mantida pela SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) entre o período de 2009 a 2018. Para os anos de 2009 a 2013, período de calibração, obteve-se um valor de 6,4625 para a soma dos quadrados dos resíduos antes dos ajustes, após os ajustes o valor passou a ser 5,6975. Após os parâmetros devidamente calibrados, foi validado período de 2014 a 2018, chegando a uma soma de quadrado dos resíduos de 5,2724, com R^2 de 0,4475. De forma geral, o modelo gerado pelo SWAT se mostrou bastante eficiente, com possibilidade de simulação de processos hidrossedimentológico.

Palavras-chave: dados climáticos; modelagem hidrológica; hidrografia.

ABSTRACT

BORGES, J. C. A. **Modeling and hydrological simulation in the Santa Rita river basin - SP - Brazil**. 2021. 65 p. Monograph (Graduation) - Bachelor's Degree in Environmental Engineering, Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2021.

It requires a growing demand for water resources, the most varied tools start to gain importance, among them the environmental modeling through prediction software, such as the SWAT (Soil and Water Assessment Tool). This work aims to obtain a space-time model capable of simulating the flow of the Santa Rita River watershed, acquired in the municipalities of Embu-Guaçu, Juquitiba and São Lourenço da Serra, in the Metropolitan Region of São Paulo. For that, it is necessary to characterize the study area, covering physical data such as topography, pedology, land use and occupation, in addition to combination climatological data, winds, humidity, temperature and solar radiation. This study was divided into 3 stages: 1- obtaining and preparing the input data; 2 - pre-processing, where they were determined as Hydrological Response Units (HRU); and 3 - processing, calibration, validation and simulation. The simulated data were compared with data observed in a monitoring station by SABESP (Basic Sanitation Company of the State of São Paulo) between the period of 2009 to 2018. For the period of 2009 to 2013, calibration period, we obtained a value of 6.4625 for the sum of the squares of the residuals before the adjustments, after the adjustments the value passed until the series 5.6975. After the duly calibrated parameters, the period from 2014 to 2018 was validated, reaching a reduced residue sum of 5.2724, with an R^2 of 0.4475. In general, the model generated by the SWAT proves to be quite efficient, with the possibility of simulating hydro sedimentological processes.

Key-words: climatic data; hydrological modeling; hydrography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista da bacia hidrográfica do rio Santa Rita e seus principais componentes.....	15
Figura 2. Relação de escoamento superficial e chuva no método SCS-CN.	21
Figura 3. Delimitação da microbacia do rio Santa Rita.....	25
Figura 4. Fluxograma de processos para elaboração do modelo SWAT.	27
Figura 5. Declividade percentual da microbacia do rio Santa Rita.	33
Figura 6. Evapotranspiração média da bacia para o período de 2008 a 2013 (a) e 2013 a 2018 (b).....	34
Figura 7. Carta hipsométrica da área de estudo.	35
Figura 8. Perfil topográfico das calhas principais da bacia, rio Santa Rita (a), Rio das Lavras (b) e Córrego Chororoca (c).	36
Figura 9. Pedologia da microbacia do rio Santa Rita.	37
Figura 10. Usos e ocupações na observados na área de estudo.....	39
Figura 11. Sub-bacias geradas automaticamente pelo SWAT.....	41
Figura 12. Série temporal da variação da temperatura máxima e mínima.	41
Figura 13. Série temporal da variação da umidade relativa do ar.	42
Figura 14. Série temporal da precipitação diária.	42
Figura 15. Série temporal da variação diária da radiação solar.	42
Figura 16. Série temporal da variação da velocidade média do vento.	43
Figura 17. Vazão para o período de 2011, ano que apresentou o melhor SQR após a calibração.....	46
Figura 18. Vazão para o período de 2012, ano que apresentou o pior SQR após a calibração.....	47
Figura 19. Vazão para o período de 2014, ano que apresentou o melhor SQR após a calibração.....	49
Figura 20. Vazão para o período de 2016, ano que apresentou o pior SQR após a calibração.....	50
Figura 21. Boxplot dos resíduos das simulações dos períodos de calibração e validação.	51
Figura 22. Relação entre a vazão observada e a vazão simulada ajustada para o período de 2009 a 2013.	52

Figura 23. Relação entre a vazão observada e a vazão simulada ajustada para o período de 2014 a 2018.	52
Figura 24. Pluviosidade diária e os resíduos das simulações.	53
Figura 25. Média diária de vazão, índice de escoamento superficial e média anual de transporte de sedimentos.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de entrada de características físico-químicas do solo para SWAT.....	28
Tabela 2. Parâmetros ajustados no SWAT e suas características.....	30
Tabela 3. Precipitação total anual na bacia do rio Santa Rita.....	33
Tabela 4. Características hidrológicas dos solos da bacia.....	37
Tabela 5. Parâmetros dos solos presentes na bacia.....	38
Tabela 6. Área e percentual ocupados por cada classe na bacia.....	40
Tabela 7. Valores adotados nas tentativas de ajustes dos parâmetros e valor da Soma de Quadrado dos Resíduos (SQR) obtido.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	14
3.2	BACIAS HIDROGRÁFICAS	14
3.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	16
3.3.1	Modelos Computacionais.....	16
3.3.2	Modelo SWAT.....	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	25
4.2	FASES DA MODELAGEM	26
5	RESULTADOS	33
6	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

A água é recurso vital para a sobrevivência humana, sua escassez gera problemas, como redução da produção agrícola, industrial, geração de energia, dessedentação de animais e principalmente a falta de água para abastecimento público. No Brasil, o consumo de água saltou de 131 mil litros por segundo em 1931, para 2 milhões e 83 mil litros por segundo, em 2019, e estima-se que este valor deva crescer cerca de 24% até 2030, conforme estudo elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2019).

Com o aumento do consumo de água, pode-se ter a falta deste recurso, que em muitos casos no Brasil não se dá unicamente pela estiagem, mas em grande parte pela falta de planejamento e gestão. Compreender os processos existentes nas bacias hidrográficas, bem como os impactos gerados pela ação humana são fatores que definem as tomadas de decisões (JACOBI; EMPINOTTI; SCHMIDT, 2016; SORIANO *et al.* 2016; TUNDISI, 2008).

Essa falta de planejamento, entre outras formas pode ser notada pela ocupação desordenada nas bacias, principalmente nos centros urbanos, onde ocorrem a supressão vegetal e a substituição por áreas impermeabilizadas. Essas substituições afetam toda a dinâmica de escoamento da água até os corpos hídricos, gerando alagamentos, redução da infiltração e recarga dos lençóis freáticos e o transporte de poluentes e sedimentos para os corpos hídricos. Há ainda a supressão vegetal na zona rural onde ocorre a implementação de sistemas agrícolas que fazem uso intensivo de produtos químicos como fertilizantes e defensivos agrícolas que também são carregados para os mananciais (SANTOS, *et al.* 2016; SANTOS, 2005; VANZELA; HERNANDEZ; FRANCO, 2010).

Os problemas supracitados devem ser abordados pelos gestores das bacias hidrográficas em conjunto com as organizações públicas municipais, estaduais e federais e a sociedade, para garantir a “produção” de água e minimizar os problemas socioambientais.

O monitoramento de corpos hídricos e do clima da bacia hidrográfica e a consequente geração de bancos de dados públicos podem ser uma das formas de tornar viável esse processo de gestão. Bancos de dados e sistemas capazes de descrever e prever comportamentos nas bacias hidrográficas são fundamentais para dar embasamento técnico-científico aos gestores públicos, que de posse destas

informações podem definir políticas públicas que maximizem a qualidade do investimento (CARVALHO, S. M., 2004; SCHUSSEL; NASCIMENTO NETO, 2015).

Os diversos sistemas de monitoramento geram grande volume de dados, cuja análise requer operações computacionais que possibilitem a transformação desses dados em informações e, com a ajuda dos profissionais da área, tais informações possam gerar conhecimento.

É nesse contexto que Sistemas de Suporte a Decisão são importantes. De acordo com Porto e Azevedo (1997), constituem uma metodologia de auxílio à gestão baseada no uso destes dados como entrada para modelos computacionais. Os resultados da modelagem serão subsídios em processos de tomada de decisão para gestores.

Para adoção dessas ferramentas a existência de bancos de dados robustos e de acesso públicos são fundamentais, pois não é possível, por exemplo, a elaboração de modelos hidrológicos sem séries históricas, para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e simulação do comportamento das bacias hidrográficas. Estes modelos, quando bem calibrados e validados, podem ser utilizados como ferramentas técnicas de simulações para eventos futuros para tomada de decisões e a elaboração de planos e políticas públicas associadas aos recursos hídricos (FERNANDES; GALVÍNCIO; SANTOS, 2012; SOUZA; SANTOS; KOBAYAMA, 2009).

No período do final de 2013 até 2015, a Região Metropolitana de São Paulo e o Sudeste como um todo foram assolados por uma seca histórica, que associado a má gestão gerou como resultado uma das maiores crises de abastecimento de água já vistos no Brasil (SORIANO *et al.*, 2016).

Situações como essa poderiam ser evitadas se modelos adequados pudessem apresentar a possibilidade de tais crises com antecedência, permitindo ao gestor direcionar investimentos na ampliação deste serviço, de forma a não necessitar de obras emergenciais, além de reduzir o impacto do racionamento de água junto à sociedade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Calibrar um modelo hidrológico por meio do *SWAT* que descreva o comportamento da vazão ao longo do período de 2009 até 2018 da Bacia do rio Santa Rita na Região Metropolitana de São Paulo – SP.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compor um banco de dados geográfico com as características físicas da bacia do rio Santa Rita referentes a: uso do solo, topografia e pedologia;
- Realizar levantamento de dados climáticos de temperatura, umidade, pluviosidade, radiação solar e velocidade dos ventos referente ao período de 2009 a 2018 na Bacia Hidrográfica do rio Santa Rita;
- Gerar um modelo de simulação de vazão, utilizando dados climáticos e físicos de solo, uso e ocupação e topografia;
- Calibrar o modelo utilizando dados de 2009 a 2013 a fim de ajustar os parâmetros que mais influenciam os resultados de vazão;
- Validar os resultados da simulação da vazão com dados do período de 2014 a 2018.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 PROCESSOS HIDROLÓGICOS

A hidrologia é a ciência que estuda a água em todos seus aspectos: ocorrência, distribuição, movimento e propriedades no solo e subsolo terrestre (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013; VIESSMAN; LEWIS, 1995).

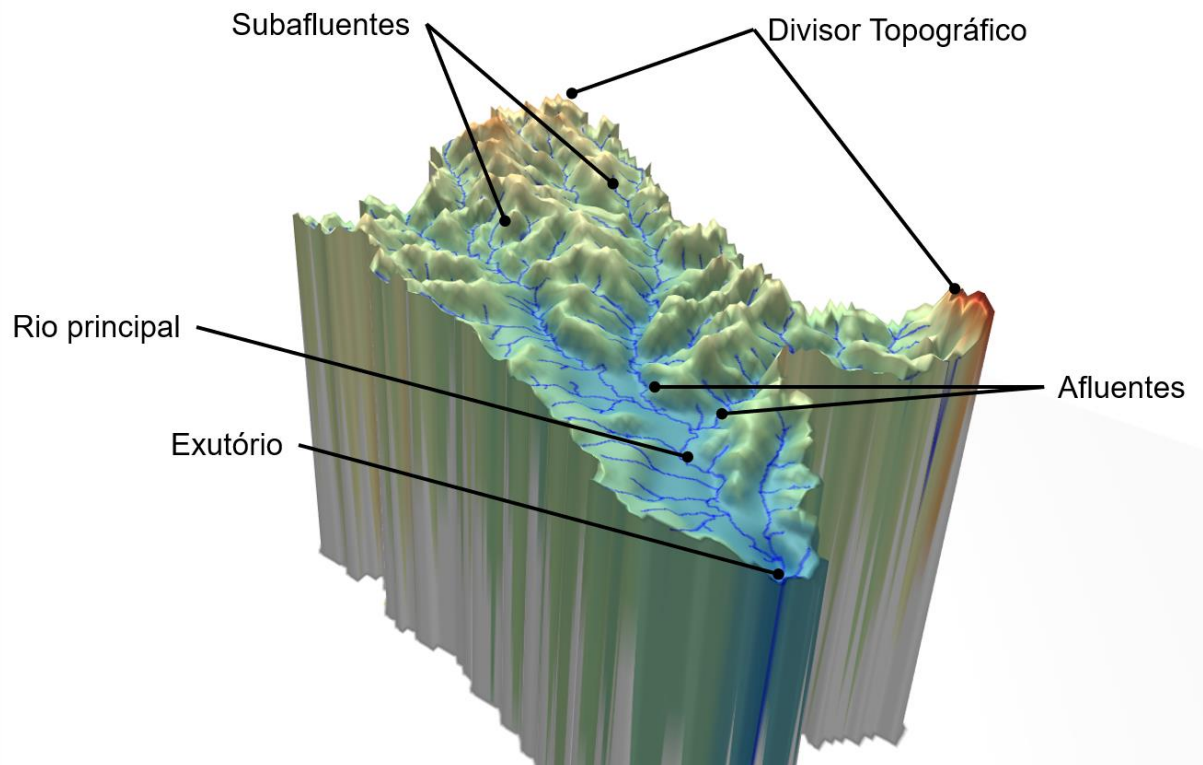
A presença de água na superfície terrestre é desigual, além de se apresentar em três distintas formas, como vapor presente na atmosfera, sólida em forma de neve e geleiras e líquida nos oceanos, mares, aquíferos, lagos e rios. De acordo com Oki e Kanae (2006); Shiklomanov e Rodda (2004); Trenberth *et al.* (2007) os lençóis freáticos correspondem à 1,7%, os lagos a 0,015% e os rios a 0,0002% do total de água existente no planeta.

Essa água circula pelo planeta, formando o Ciclo Hidrológico, que segundo Collischonn e Dornelles (2013) se dá por meio da influência da radiação solar sobre a superfície do planeta aquecendo a água e desencadeando, além de outros, os processos de evaporação da água líquida e a evapotranspiração da água do solo através das plantas. O excesso de vapor presente na atmosfera em certas condições condensa e forma gotículas precipitando em forma de chuva, granizo ou neve (OKI; KANAE, 2006). Seguindo no ciclo a precipitação líquida escoar pelo solo formando os rios ou percola formando os lençóis freáticos (BROOKS; FFOLIOTT; MAGNER, 2012).

3.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS

Bacias hidrográficas são definidas pela Agência Nacional de Águas – ANA (2011) como uma região compreendida por um território e diversos cursos d'água, onde a água escoar superficialmente até o rio principal ou por seus afluentes. Tucci (2001,) por sua vez afirma que bacias hidrográficas são a área de captação natural da água da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, o exutório, conforme demonstrado pela Figura 1.

Figura 1. Vista da bacia hidrográfica do rio Santa Rita e seus principais componentes.



Fonte: Autoria própria, (2021).

De acordo com Reschilian e Bevilacqua (2012) a bacia hidrográfica passou a ter status de unidade territorial de planejamento após conflitos relativos à oferta hídrica, tanto em qualidade como em quantidade, para que pudesse suprir as necessidades de sobrevivência humana e também a geração de renda.

A partir de 1997, com a promulgação da Lei Nº 9.443, Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL, 1997), a bacia hidrográfica como unidade de planejamento passou a ser mais enfatizada, dando início à criação de diversos comitês de bacias contando com presença da União, Estados e Municípios, bem como do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (LIMA; NERY, 2017). A PNRH institui como ferramentas de gestão os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes, a outorga de direitos de usos, a compensação aos municípios e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Esses mecanismos de gestão são necessários para minimizar os impactos sobre os recursos hídricos, uma vez que a economia e o desenvolvimento social podem gerar estresse e até escassez de água conforme afirma Gleick (2000). Aponta-se, ainda, problemas de disponibilidade e aumento da demanda sem ações de correção e enfrentamento de crises como expõem Somlyody e Varis (2006).

Existem diversas formas de se quantificar e qualificar os impactos gerados nas bacias hidrográficas. Stipp e Mendonça (2010) utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG) observaram a fragilidade e o potencial de erodibilidade na bacia do rio Taquara, na região norte do Paraná, por meio da análise de cartas de classes de solo, declividade e uso e ocupação do solo. Esta é uma abordagem amplamente empregada, que gera como resultados mapas de fragilidade bem detalhados, pois estes resultados podem ser classificados em níveis, facilitando a identificação de áreas potencialmente problemáticas, servindo como fonte de tomada de decisão por parte dos gestores.

Novais (2015) em seu estudo sobre a Bacia Hidrográfica do Itapicuru, na Bahia, visou caracterizar alguns parâmetros morfométricos desta bacia utilizando modelos digitais de elevação produzidos pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), por meio do uso de SIG, gerando mapas de direção de fluxo, drenagem hierarquizada, além de identificar o baixo potencial de susceptibilidade a enchentes. Esses resultados agilizam a tomada de decisão e facilitam as ações de planejamento ambiental, podendo ser aplicados em bacias hidrográficas de diferentes portes.

Uma abordagem mais avançada é a simulação hidrológica, que tem se tornado cada vez mais empregada nos últimos anos. Andrade, Mello e Beskow (2013) adotaram essa abordagem na Bacia Hidrográfica do ribeirão Jaguará, por meio do modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) tendo como objetivo obter uma representação que descrevesse de forma mais próxima da realidade o comportamento hidrológico nesta bacia. Após os processos de calibração e validação obtiveram um modelo considerado apto para simulações na área estudada, sendo uma ferramenta poderosa na obtenção de dados para a tomada de decisões, tendo em vista a possibilidade de analisar um longo período.

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

3.3.1 Modelos Computacionais

Para Pinto *et al.* (1976) os fenômenos hidrológicos podem ser considerados comuns pois podem ser facilmente observados por qualquer pessoa, porém não é correto afirmar que há um domínio completo sobre as leis que descrevem estes

processos. Outro fator que dificulta a modelagem hidrológica, principalmente quando se trata de bacias hidrográficas é a variabilidade topográfica, de solos e de fontes de perturbação, uma vez que na maioria dos modelos essas características são tratadas de forma homogênea (BRIGHENTI, 2015).

Um modelo é uma abstração da realidade. Essa abstração representa uma realidade complexa da maneira mais simples e adequada para a finalidade da modelagem (WAINWRIGHT; MULLIGAN, 2013). Ainda segundo o mesmo autor, a modelagem não é uma alternativa à observação, mas sob certas circunstâncias, pode ser uma ferramenta poderosa para entender as observações e desenvolver e testar a teoria.

Uma das classificações existentes para modelos envolvem sua relação com a representação da dimensão temporal. De acordo com Sampaio (1998), uma vez que um sistema de modelagem se modifica com o tempo, este é conhecido como sistema dinâmico, caso contrário são chamados estáticos. A simulação de processos hidrológicos são um exemplo de modelo dinâmico.

De acordo com a ênfase empregada na construção do modelo este pode ser considerado empírico, conceitual ou físico.

Os modelos empíricos, de acordo com Wainwright e Mulligan (2013), descrevem comportamentos observados de determinada variável e não dão informações de como ocorrem os processos. São empregados em funções matemáticas mais simples, como regressões, pois se ajustam facilmente, apresentam alto poder preditivo e não necessitam de leis físicas para descrever este comportamento. Por isso, estes modelos apresentam baixa capacidade explicativa, com usos bastante específicos, pois não podem, na maioria das vezes, ser generalizados.

Os modelos conceituais descrevem um sistema partindo do conhecimento prévio de como se dá a relação das variáveis entre si e como estas influenciam o objeto de estudo, apresentam médio potencial para explicar o fenômeno. Modelos de base física são derivações dedutivas baseadas nos fenômenos físicos e seus resultados devem ser consistentes com as observações, o que requer uma etapa chamada de calibração, em que é feito o ajuste de parâmetros. Sem a realização deste procedimento, tais modelos podem apresentar baixo poder preditivo. (BATISTA, 2011; BEVEN, 2002; WAINWRIGHT; MULLIGAN, 2013)

De acordo com Wainwright e Mulligan (2013) a análise de sistemas envolve a decomposição de sistemas complexos em subsistemas mais simples e de fácil gerenciamento. E o objetivo dessa análise é facilitar a compreensão dos sistemas complexos.

Há duas possibilidades quando se trata de variação temporal, tempo contínuo e discreto. Uma variável temporal contínua é usada em processos que demandam medidas de tempo com níveis arbitrários de precisão. Já a representação discreta permite a especificação de intervalos de tempo em passos constantes, como horas, dias, meses e a variação não pode ser determinada entre um intervalo e o seguinte. (PEDROSA; CÂMARA, 2004).

Quando se trata da representação espacial, esta pode ser dividida em: homogênea, quando uma área apresenta um valor único; heterogênea, quando o espaço é dividido em unidades discretas, sendo quadradas quando regulares ou ainda, triangulares ou poligonais, quando irregulares. Podem se apresentar em uma, duas ou três dimensões (BATISTA, 2011; WAINWRIGHT; MULLIGAN, 2013).

3.3.2 Modelo SWAT

O *Soil & Water Assessment Tool* ou simplesmente *SWAT*, é uma ferramenta de avaliação do solo e água. Trata-se de um modelo desenvolvido inicialmente pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) do Departamento de Agricultura (USDA), em parceria com a *Texas A&M University*, na década de 90, nos Estados Unidos (NEITSCH *et al.* 2009).

De acordo com Gassman *et al.* (2007) *SWAT* é um modelo de tempo contínuo, em escala de bacia, operando em passo de tempo diário, desenvolvido para estimar impactos sobre os constituintes de uma bacia, a partir de fatores como clima, hidrologia, características do solo, entre outros. Neitsch *et al.* (2009) ainda explicam que, em virtude dessas características, esta ferramenta não é desenvolvida para simular de forma detalhada eventos únicos como cálculos de propagação de cheias, mas sim modelos de eventos de longo prazo.

Neitsch *et al.* (2009) explicam ainda que o *SWAT* requer informações específicas sobre clima, propriedades do solo, topografia e práticas de gestão do solo na bacia. É, portanto, um modelo físico, em detrimento a modelos empíricos, que normalmente utilizam apenas equações de regressão para descrever o

comportamento da bacia. Gassman *et al.* (2007) por sua vez reforça que no SWAT uma bacia hidrográfica é subdividida em unidades de respostas hidrológicas (URH) que consistem em áreas com características homogêneas do uso da terra, manejo e solo. Por meio do SWAT é possível realizar simulações de vazão, geração e transporte de sedimentos, áreas inundáveis, qualidade da água, erosão, entre outras.

O SWAT (e mais recentemente o SWAT+, sua versão mais atual) tem se tornado uma das principais ferramentas de modelagem de bacias hidrográficas, graças às suas mais diversas possibilidades de aplicação na obtenção de informações para a gestão de bacias, com um número cada vez maior de estudos que o utilizam.

No SWAT a modelagem é feita em uma sequência de etapas. Inicialmente faz-se a delimitação da área de estudo com base na altimetria da região, gerando assim a bacia e suas subdivisões (CARVALHO, 2014). A partir da obtenção das unidades de respostas hidrológicas é que se dá início a simulação hidrológica, utilizando as informações climáticas fornecidas, o programa aplica os dados sobre estas URHs e o modelo calcula os fluxos d'água e sedimentos em cada uma das subdivisões existentes, em seguida essas respostas geradas são direcionadas para os leitos da rede hidráulica (ARNOLD *et al.* 1998).

Os fenômenos hidrológicos ainda são divididos em duas partes pelo SWAT. Arnold *et al.* (1998) explicam que na primeira parte, está a fase terrestre do processo hidrológico, é nesta etapa que são determinadas as quantidades de água, sedimentos e nutrientes carregadas para as calhas dos rios. Na segunda etapa, correspondente a fase aquática, estão os processos referentes ao movimento da água e dos sedimentos pela rede hídrica. Para estimar o balanço hídrico, o escoamento superficial (CN) e a evapotranspiração o SWAT adota as equações 1, 2, 3 e 4.

Conforme Neitsch *et al.* (2009) explicam, é na fase terrestre do ciclo hidrológico que é adotada a equação de balanço hídrico (Eq. 1):

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

Onde:

SW_t = quantidade de água final na camada radicular do solo simulada no tempo t (mm);

SW_0 = quantidade inicial de água no solo (mm);

t = duração do ciclo hidrológico simulado (dias);

R_{day} = quantidade de água precipitada no dia i (mm);

E_a = quantidade de água evapotranspirada no dia i (mm);

W_{seep} = quantidade de água percolada da camada simulada para a camada inferior no dia i (mm);

Dessa forma é quantificada a água presente em cada uma das fases do ciclo para um determinado intervalo de tempo (FREIRE e OMENA, 2005).

Para determinar o escoamento superficial, o SWAT utiliza o método da Curva-Número (CN), desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solo dos Estados Unidos, sendo capaz de determinar a quantidade de chuva que infiltra no solo ou no aquífero e o quanto escoar pela superfície do solo (NEITSCH *et al.* 2005; ZHAN, HUANG, 2004).

De acordo com Gonçalves (2007) o CN é um parâmetro adimensional e seus valores encontram-se tabelados de acordo com a combinação do grupo hidrológico do solo com o tipo de cobertura e tratamento da terra, ambos associados a uma condição de umidade antecedente do solo. O CN representa ainda uma curva média de infiltração que separa a parte da precipitação que escoará superficialmente. A equação da Curva-Número para o escoamento superficial é dada por (eq. 2):

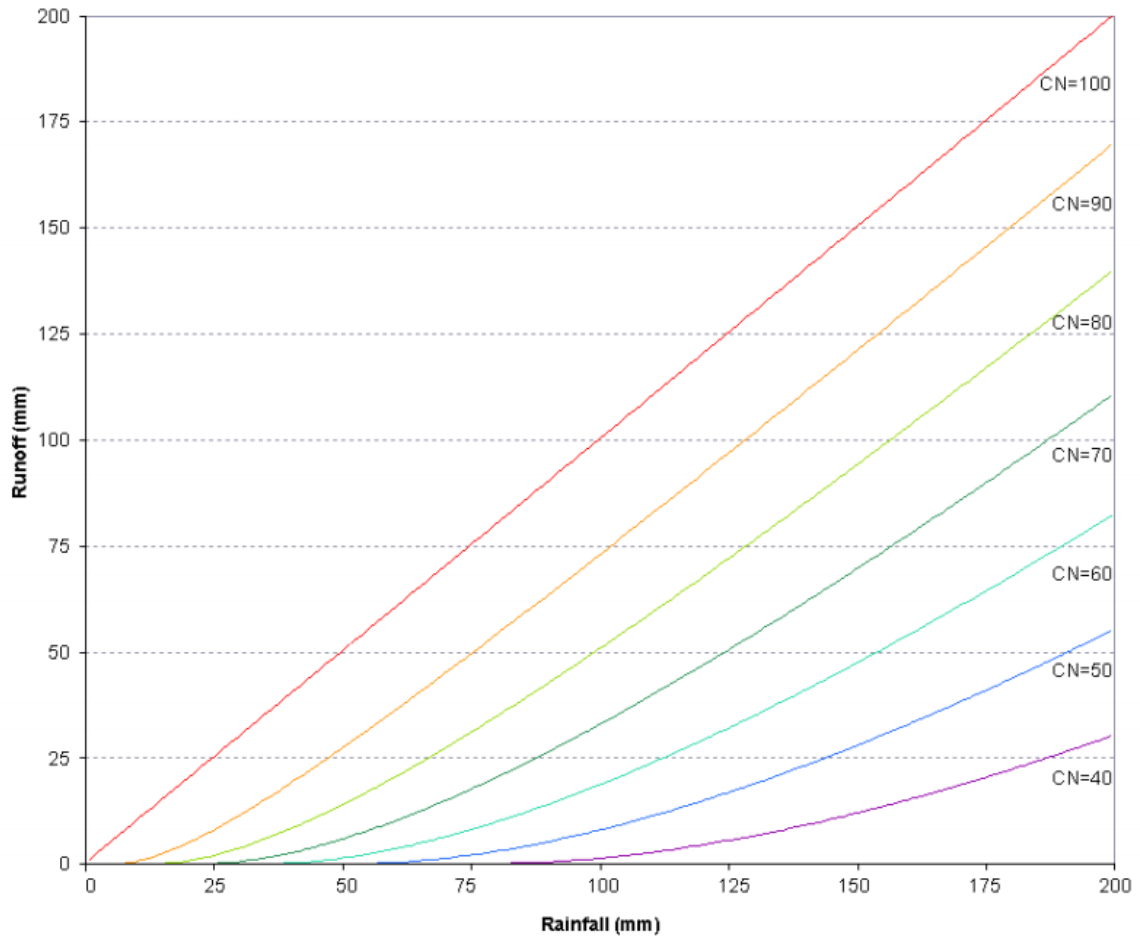
$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad S = \text{capacidade máxima de retenção do solo (mm)} \quad (2)$$

Resolvendo a equação para CN (eq. 3):

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad \text{para precipitação em mm} \quad (3)$$

Os valores de CN retratam as condições do solo, podem variar desde uma cobertura muito permeável (limite inferior = 0) até uma cobertura completamente impermeável (limite superior = 100) (GONÇALVES, 2007). Nota-se, porém, a existência de condições teóricas extremas de S , ora tendendo ao infinito, ora sendo nulo (Figura 2)

Figura 2. Relação de escoamento superficial e chuva no método SCS-CN.



Fonte: Neitsch *et al.* (2009).

As características dos grupos hidrológicos do solo, apresentadas pelo *Soil Conservation Service* (SCS), são (SARTORI, 2005):

a) Grupo A: Solos de baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areia ou cascalho, ambos profundos e excessivamente drenados. Índice mínimo de infiltração: $>7,62 \text{ mm h}^{-1}$.

b) Grupo B: Solos com taxa moderada de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a grossa. Índice mínimo de infiltração: $3,81 - 7,62 \text{ mm h}^{-1}$.

c) Grupo C: Solos com baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração. Índice mínimo de infiltração: $1,27 - 3,81 \text{ mm h}^{-1}$.

d) Grupo D: Alto potencial de escoamento, os solos possuem taxa de infiltração baixa, quando completamente molhados, caracterizados por solos argilosos com alto potencial de expansão. Contém nesse grupo solos com grande permanência de lençol freático elevado, solos com argila dura ou camadas de argila próxima da superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. Índice mínimo de infiltração: $< 1,27 \text{ mm h}^{-1}$.

A evapotranspiração por sua vez é determinada por meio da equação de Penman Monteith (eq. 4), sendo um termo do balanço hídrico (E_c), conforme descrevem NEITSCH *et al.* (2011). Esta equação é obtida por meio de representações simplificadas do fluxo de calor latente e sensível a partir de uma superfície úmida associada a equação do balanço de energia. Considera os valores de radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

$$\lambda E = \frac{\Delta * (H_{net} - G) + \rho_{air} * c_p * \left[\frac{e_z^0 - e_z}{r_a} \right]}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (4)$$

Sendo:

λE é o fluxo de calor latente ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

E é a profundidade da taxa de evaporação ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$);

Δ é a inclinação da curva pressão de saturação de vapor pela temperatura, $\partial e / \partial T$;

H_{net} é a radiação líquida diária ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);

G é a densidade do fluxo de calor para o solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

ρ_{ar} é a densidade do ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

c_p é o calor específico a temperatura constante ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$);

e_z^0 é a pressão de saturação de vapor do ar na altura z (kPa);

e_z é pressão de vapor da água na altura z (kPa);

γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$);

r_c é a resistência a copa das plantas;

r_a é a resistência da difusão da camada do ar.

De acordo com Tucci (1998) os métodos mais utilizados para a estimativa da evapotranspiração potencial são os métodos de Thornthwaite e o método de Penman Monteith. O primeiro, é frequentemente utilizado, mesmo com as grandes limitações e por vezes subestimar os resultados por utilizar apenas a temperatura. O segundo é

o mais recomendado, por ser mais completo, pois exige mais informações climáticas, mas que nem sempre estão facilmente disponíveis. No entanto, como a variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração não é tão grande, se comparada à da precipitação, esses dados podem ser utilizados de estações que se situam fora da bacia.

Os pesquisadores Guevara-Ochoa, Medina-Sierra e Vives (2020) por meio do *SWAT* buscaram implementar um modelo hidrológico-hidrogeológico ligado aos cenários de mudanças climáticas para quantificar a dinâmica espaço-temporal do balanço hídrico e as interações entre as águas subterrâneas e águas superficiais na bacia do riacho Del Azul em Bueno Aires. Utilizando dados de 2003 a 2015 para calibrar o modelo e comparar dois cenários climáticos locais, obteve-se uma simulação para o período de 2020-2050. Observou-se que o cenário indica alterações significativas para os padrões espaço-temporais, e o balanço hídrico afeta as trocas entre as águas superficiais e subterrâneas afetando principalmente as recargas do lençol, invertendo em alguns setores o fluxo de água, ou seja, ao invés do lençol freático alimentar o rio, o rio irá alimentar o lençol, reduzindo o nível de água do rio e produzindo áreas de seca.

No estudo desenvolvido por Ghimire *et al.* (2020) sobre a movimentação dos fertilizantes nitrogenados aplicados nas culturas, ressalta-se que uma fração é volatilizada, lixiviada, imobilizada e emitida em forma de gases. Utilizando modelos baseados em processos como *Daily CENTURY*, *Denitrification-Decomposition (DNDC)* para determinar a emissão de N_2O nas fazendas agrícolas e bacias hidrográficas, em comparação ao modelo obtido por meio do *SWAT*, notaram que esta ferramenta apresenta grande potencial para estudos de emissões de N_2O , vista sua versatilidade e qualidade de resultados.

Outra demonstração do potencial de uso do *SWAT* é apresentada por Cambien *et al.* (2020), que testaram se a ferramenta seria adequada para simular a dinâmica de dois pesticidas na bacia agrícola no rio Guayas, no Equador. Após as devidas validações do modelo de fluxo da bacia, foi realizada a simulação do comportamento dos pesticidas na bacia. Os resultados foram satisfatórios, sendo recomendados alguns monitoramentos prolongados das concentrações de pesticidas para elevar a confiabilidade dos modelos.

Já no Brasil, esta ferramenta tem sido amplamente empregada na modelagem de bacias nos mais diferentes biomas. Castro (2013), por exemplo, objetivou avaliar a

aplicabilidade do modelo SWAT em uma bacia agrícola no bioma cerrado. Situada no sudeste do Distrito Federal, a bacia do Alto Rio Jardim é uma bacia experimental, monitorada por um conjunto de universidades em parceria com a EMBRAPA. Apesar do alto índice de monitoramento, os resultados obtidos não foram satisfatórios, conforme afirma a autora.

Martins *et al.* (2020) visaram aplicar o modelo em uma bacia hidrográfica marcada pela expansão do cultivo de cana-de-açúcar na região de Limeira – SP, caracterizada pela presença de Cerrado e Floresta Latifoliada Tropical. A expansão da monocultura da cana avançou 17% em 10 anos, gerando preocupação acerca dos impactos sobre os recursos hídricos locais. De acordo com os autores, o modelo mostrou-se bem eficiente após as devidas calibrações. Os autores concluem que o SWAT pode ser utilizado como ferramenta de gestão de recursos hídricos e planejamento agroambiental na predição de cenários alternativos de uso e ocupação do solo nesta bacia.

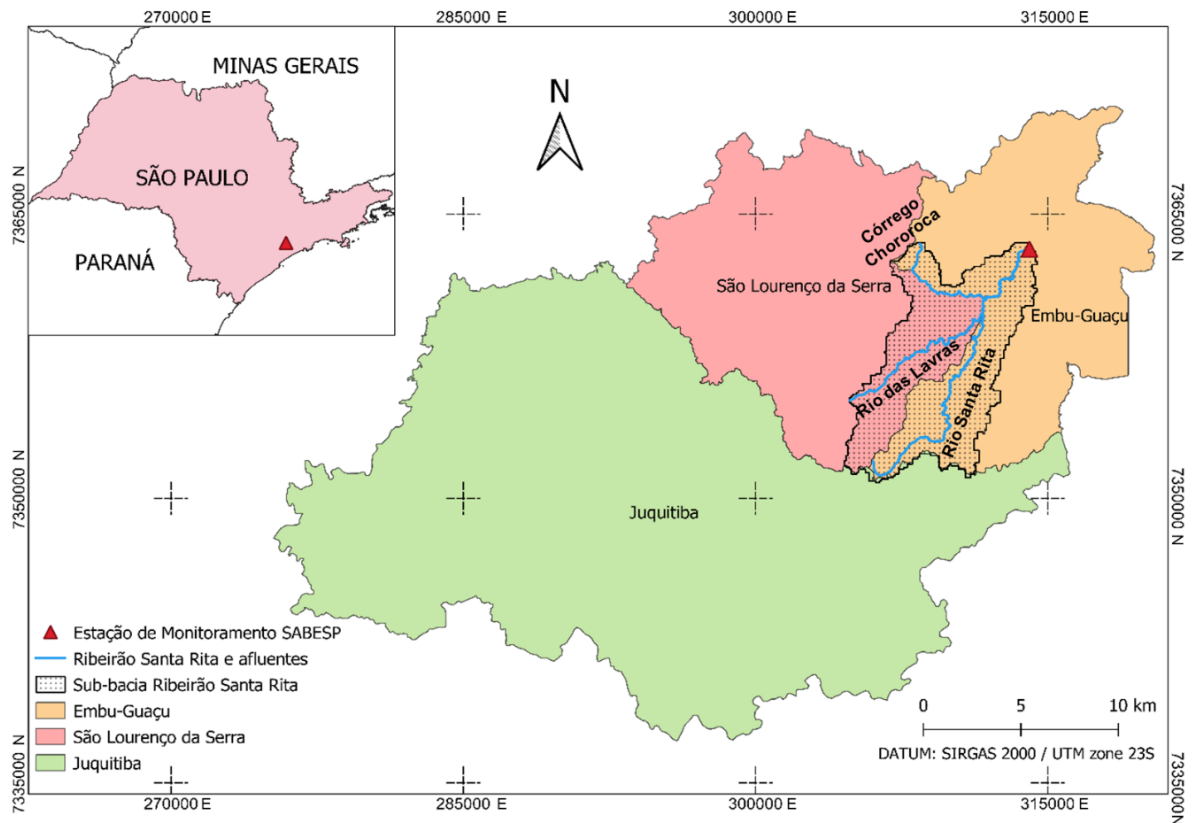
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a porção superior da microbacia do rio Santa Rita, localizada na porção sudoeste da sub-bacia Cotia-Guarapiranga que faz parte da Bacia do Alto Tietê. Aproximadamente 70% da bacia do Alto Tietê está contida na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), região altamente urbanizada onde estimativas para 2016 indicavam que cerca de 21,6 milhões de habitantes vivem (EMPLASA, 2019). Trata-se de uma região de grande importância econômica, por possuir cerca de 17,7% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro.

A microbacia do rio Santa Rita conta com área total de aproximadamente 74,5 km², isso corresponde a 1,3% da área total da Bacia do Alto Tietê. Esta microbacia localiza-se na divisa dos municípios de São Lourenço da Serra, Embu-Guaçu e Juitituba, conforme Figura 3.

Figura 3. Delimitação da microbacia do rio Santa Rita.



Fonte: Autoria própria, (2020).

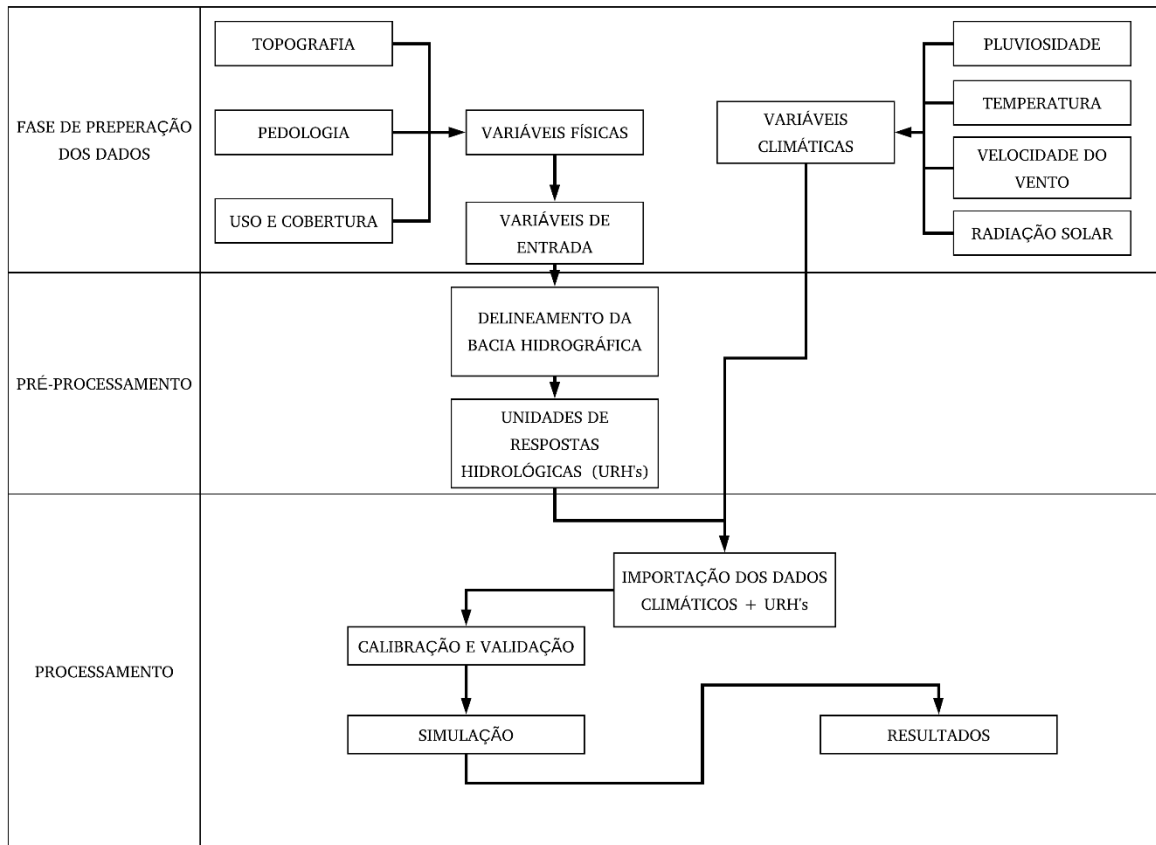
A bacia do rio Santa Rita é composta por mais outras duas calhas principais, o rio das Lavras e o córrego Chororoca. O rio Santa Rita corta o município de Embu-Guaçu, sua nascente se encontra na divisa entre São Lourenço da Serra e Embu-Guaçu, no bairro de Santa Rita, e desagua no Rio Embu-Guaçu, dentro do Parque Ecológico Várzea do Embu-Guaçu abastecendo a represa Guarapiranga.

A porção da microbacia foi delimitada com base na drenagem superficial limitada pelo ponto exutório onde está localizada a estação de monitoramento da SABESP situada em 314087E e 7363143N (referenciadas no sistema SIRGAS 2000 UTM zone 23 Sul). A estação é identificada pelo código SB-GU-G8 ou Posto rio Santa Rita e apresenta dados telemétricos diários de nível, vazão e pluviosidade. Os dados climáticos de radiação solar, velocidade dos ventos, temperatura, umidade relativa do ar foram obtidos juntos a estação de monitoramento climático do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, localizada na cidade de São Paulo, denominada Mirante de Santana, registrada sob código 83781, situada em 308596,0894E e 4834026.541N (referenciadas no sistema SIRGAS 2000 UTM zone 23 Sul)

4.2 FASES DA MODELAGEM

O desenvolvimento de um modelo *SWAT* está ilustrado na Figura 4, que apresenta as etapas que foram executadas e as informações que necessárias em cada fase.

Figura 4. Fluxograma de processos para elaboração do modelo SWAT.



Fonte: Autoria própria, (2020).

Este trabalho foi dividido em três etapas, conforme demonstrado pela Figura 4, na primeira fase foram coletados e preparados os dados requisitados pelo SWAT para elaboração deste estudo. Para tanto, foi necessário obter dados georreferenciados de altimetria, pedologia, bem como uso e ocupação do solo. Os dados climáticos por sua vez foram diários, de um ponto contido na área de estudo, referentes a precipitação, radiação solar, umidade e intensidade dos ventos.

Foram utilizados dados altimétricos da missão *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) do projeto TOPODATA (INPE, 2011), cujo pixel possui resolução de 30m. As informações altimétricas contidas neste conjunto de dados permitem a identificação da direção dos fluxos de água, necessários para delimitação de bacias e sub-bacias. Este é um processo automático, baseado nos dados do Modelo Digital de Elevação (MDE), que define a orientação dos fluxos d'água superficial conforme as variações das cotas altimétricas das células da grade. Através desse processo foram delimitadas as URH. As URHs são as menores unidades espacial do modelo e se caracterizam pela uniformidade da declividade, uso e ocupação do solo e das classes pedológicas (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005).

Os dados pedológicos da bacia também são necessários, pois interferem no comportamento do escoamento da água tanto no fluxo superficial, quanto na sua percolação. O mapa digital de solos foi obtido junto ao site Instituto Florestal do Estado de São Paulo, elaborado por Rossi (2017). Estes mapas contêm informações de classes de solos, textura e em alguns casos, declividade e profundidade.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) classifica os solos quanto a suas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. Ainda de acordo com esse sistema, a textura dos solos é altamente influente no comportamento físico-hídrico, indicando sua importância neste estudo (SANTOS *et al.* 2018).

Saxton e Rawls (2006) desenvolveram uma planilha que utiliza um método chamado função de pedotransferência para obter, a partir de outros dados de granulometria, carbono orgânico, número e profundidade dos horizontes, 12 parâmetros, apresentados na Tabela 1, que são essenciais para o SWAT.

Tabela 1. Parâmetros de entrada de características físico-químicas do solo para SWAT.

Parâmetros	Descrição
SOL_ZMX	Profundidade máxima do enraizamento do perfil do solo (mm).
ANION_EXCL	Fração de porosidade.
SOL_CRK	Potencial ou volume máximo de fissura do perfil do solo, expresso em fração do volume total do solo.
TEXTURE	Textura da camada do solo.
SOL_Z	Profundidade da camada de solo (mm).
SOL_BD	Densidade do solo úmido ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$).
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada dos solos ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$).
SOL_CBN	Teor de carbono orgânico.
SOL_ALB	Albedo do solo úmido.
USLE_K	Equalização da erosão do solo.
SOL_EC	Condutividade elétrica ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$).

Fonte: SWAT Documentation (2019)

O uso e cobertura da terra é um conjunto de fatores físicos que impacta o comportamento hidrológico em uma bacia, visto que a urbanização pode gerar impermeabilização e assim alterar o fluxo de água no solo. Este conjunto de informações foi obtido do Projeto MapBiomias (PROEJTO MAPBIOMAS, 2020). Os mapas de cobertura e uso do solo do MapBiomias possuem pixel com resolução de 30m e formato matricial.

Para utilização da carta topográfica, mapa digital de solos e mapa de uso de uso e ocupação do solo pelo SWAT, estes foram reprojitados utilizando o Datum Sirgas 2000 e projeção cartográfica UTM 23 Sul.

Os dados climáticos de pluviosidade, temperatura, velocidade dos ventos e radiação solar compõem a caracterização climática. Os dados de pluviosidade foram obtidos por meio do sistema de monitoramento dos Mananciais da Região Metropolitana de São Paulo, mantido pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que capta e armazena séries de dados referentes às estações de monitoramento. Os demais dados climáticos foram obtidos junto ao banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020).

A etapa de pré-processamento na Figura 4, compreendeu a delimitação da bacia hidrográfica e as sub-bacias. Neste processo são fornecidos dados do Modelo Digital de Elevação e que permitiu a obtenção dos canais e por consequência a área da bacia e sub-bacias. Suas URHs são formadas pela sobreposição do mapa de sub-bacias e os mapas de solos e uso e ocupação do solo, pela determinação automática de áreas homogêneas.

A etapa final de processamento foi realizada por meio da junção dos dados físicos gerados nos processos anteriores com os dados climáticos necessários. Nesta etapa o modelo processou os dados físicos e climáticos, do período de 01/01/2009 a 31/12/2013.

Após a obtenção deste modelo, foi necessária sua calibração. Os parâmetros mais comuns citados na literatura foram ajustados e os resultados das novas simulações foram observados por meio gráfico e pelo método da Soma do Quadrado dos Resíduos (SQR), equação 5.

$$SQR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i,m} - Q_{i,s})^2 \quad (5)$$

onde:

n = total de dados observados;

Q = vazão;

m = valor medido;

s = valor simulado.

Dentre os parâmetros testados, foram selecionados os apresentados na Tabela 2 conforme recomendações de Abbaspour *et al.* (2015).

Tabela 2. Parâmetros ajustados no SWAT e suas características.

Parâmetros	Significado
awc	Capacidade de água disponível da camada de solo (mm H ₂ O / mm solo). A água disponível da planta, também chamada de capacidade de água disponível. A capacidade de água disponível é estimada através da determinação da quantidade de água liberada entre a capacidade de campo in situ (o teor de água do solo no potencial mátrico do solo de -0,033 MPa) e o ponto de murcha permanente (o teor de água do solo no potencial matricial do solo de -1,5 MPa).
cn2	O número de curva da condição de umidade II.
surlag	Coefficiente de defasagem de escoamento superficial. Em grandes sub-bacias com tempo de concentração superior a 1 dia, apenas uma parte do escoamento superficial atingirá o canal principal no dia em que for gerado. SURLAG controla a fração do total de água disponível que poderá entrar no alcance em qualquer dia.
esco	Fator de compensação da evaporação do solo. Este coeficiente foi incorporado para permitir ao usuário modificar a distribuição de profundidade usada para atender a demanda evaporativa do solo para contabilizar o efeito da ação capilar, crostas e rachaduras. ESCO deve estar entre 0,01 e 1,0. À medida que o valor do ESCO é reduzido, o modelo é capaz de extrair mais da demanda evaporativa de níveis mais baixos.

revap_co	<p>Coeficiente de "revap" da água subterrânea. A água pode mover-se do aquífero raso para a zona insaturada sobrejacente. Nos períodos em que o material que recobre o aquífero está seco, a água na franja capilar que separa as zonas saturadas e insaturadas irá evaporar e se difundir para cima. À medida que a água é removida da franja capilar por evaporação, ela é substituída pela água do aquífero subjacente. A água também pode ser removida do aquífero por plantas com raízes profundas, que são capazes de captar água diretamente do aquífero. Este processo é significativo em bacias hidrográficas onde a zona saturada não está muito abaixo da superfície ou onde plantas com raízes profundas estão crescendo. Como o tipo de cobertura vegetal afetará a importância do revap no balanço hídrico, os parâmetros que governam o revap podem variar de acordo com o uso do solo.</p>
revap_min	<p>A profundidade limite da água no aquífero raso para "revap" ou percolação para o aquífero profundo (mm H₂O). O movimento da água do aquífero raso para a zona não saturada é permitido apenas se o volume de água no aquífero raso for igual ou maior que REVAPMN. Essa variável, junto com GW_REVAP, é a razão pela qual um arquivo de água subterrânea diferente é criado para cada HRU ao invés de cada sub-bacia.</p>
slope	Inclinação média do declive em HRU (m / m)
slope_len	Comprimento médio do declive para erosão (m)
ovn	Valor "n" de Manning para fluxo superficial

Fonte: adaptado de SWAT Documentation (2019)

Ao todo foram utilizados nove parâmetros, o método de substituição escolhida junto ao SWAT foi a alteração do valor pela porcentagem especificada, que modifica os parâmetros conforme variação percentual elevando ou reduzindo este valor (ABBASPOUR, *et al.* 2015; ALMEIDA; PEREIRA; PINTO, 2018; MARTINS *et al.* 2020).

Após estes ajustes foi realizada uma nova verificação, chamada de validação, em que os dados gerados são comparados aos observados, referentes aos anos de 2014 a 2018. Para tal validação foi utilizada o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), cuja expressão é apresentada a seguir:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{obs,med})^2} \quad (6)$$

Onde:

NSE = Índice

Q_{obs} = vazão observada ($m^3 s^{-1}$);

Q_{sim} = vazão simulada ($m^3 s^{-1}$);

$Q_{obs,med}$ = média da vazão observada ($m^3 s^{-1}$) e

n = número de eventos considerados.

De acordo com Moriasi *et al.* (2007), o índice NSE, trata-se de um valor adimensional e normalizado que expressa a variação residual em relação aos dados observados, indicando quão bem ajustados a uma reta 1:1 estes dados estão. Os valores de NSE variam de infinito negativo a 1, ou seja $(-\infty, 1]$, sendo 1 o ajuste perfeito. A Tabela 5 demonstra a classificação deste índice.

Tabela 3. Classificação de desempenho para o NSE segundo Moriasi *et al.* (2007).

Classificação do desempenho	NSE
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$

5 RESULTADOS

De acordo com a Köppen e Geiger, o clima na área da bacia é classificado como Cfa, clima subtropical úmido, com pluviosidade média por volta de 1500 mm anuais, a Tabela 4 apresenta as variações anuais de precipitação ao longo dos anos de 2009 a 2018.

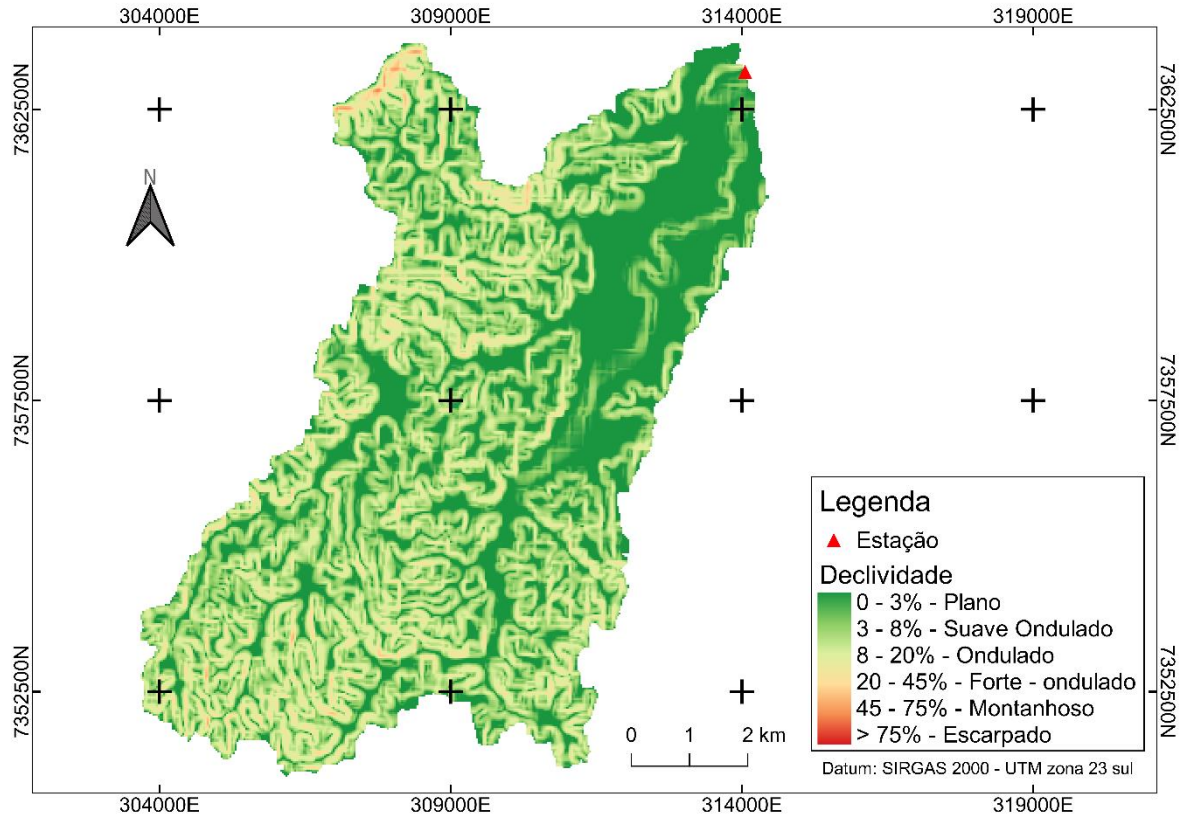
Tabela 4. Precipitação total anual na bacia do rio Santa Rita.

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Precipitação (mm)	1426	1321	1187	1297	1134	1082	1776	1888	1520	1712

Fonte: Autoria própria (2021).

A bacia do rio Santa Rita possui declividade média de 11,15%, sendo considerada de relevo ondulado em sua maior parte. A Figura 5 representa a variabilidade da declividade percentual ao longo da área da bacia.

Figura 5. Declividade percentual da microbacia do rio Santa Rita.

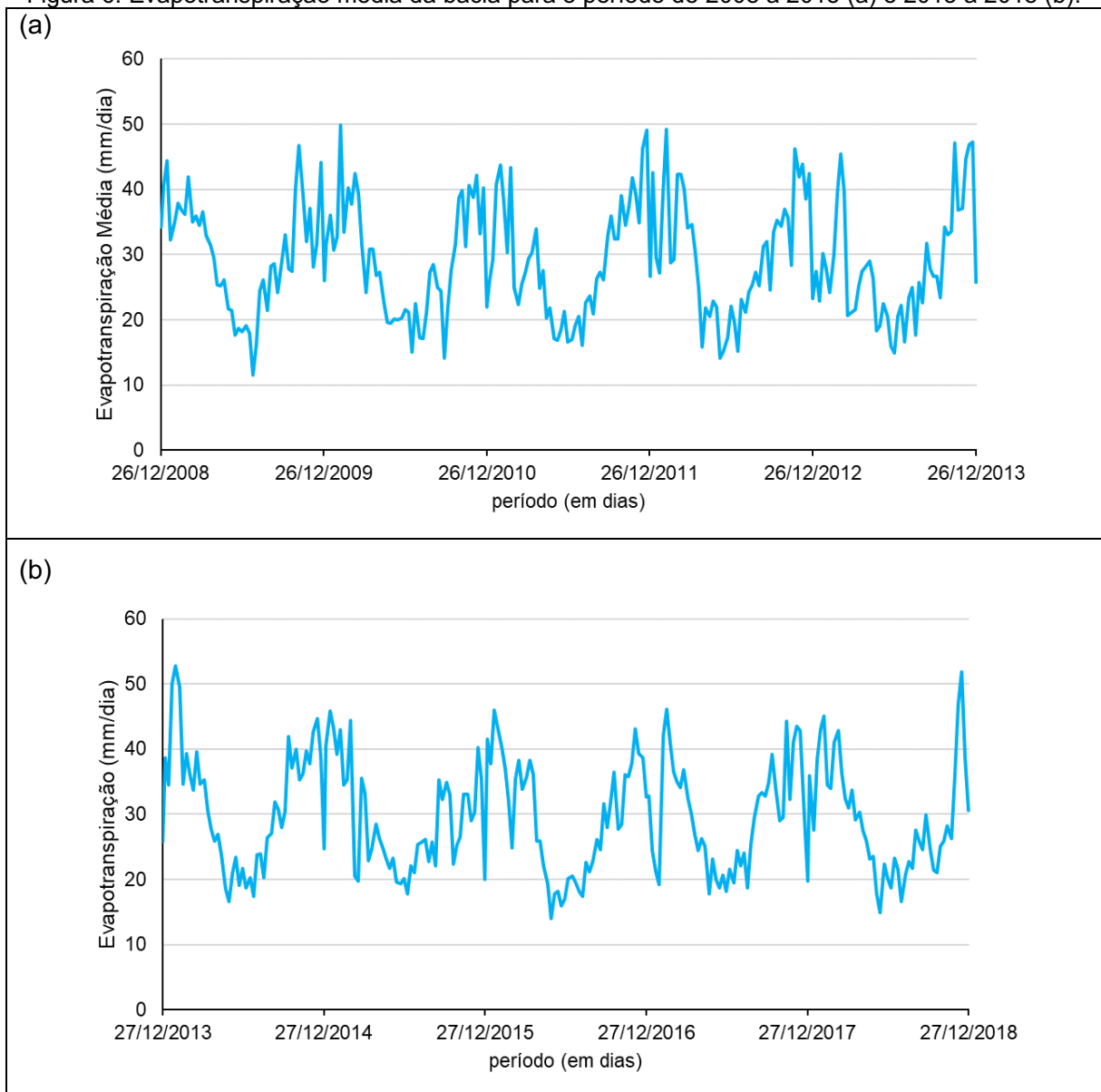


Fonte: Autoria própria (2021).

A bacia conta com uma densidade de drenagem na ordem de $2,17 \text{ km/km}^2$, que de acordo com a classificação de Horton (1945) indica que a bacia possui boa drenagem. O tempo de concentração da bacia do rio Santa Rita está por volta de 5,32 horas, de acordo com a equação de Kirpich (MAMÉDIO; CASTRO; CORSEUIL, 2018).

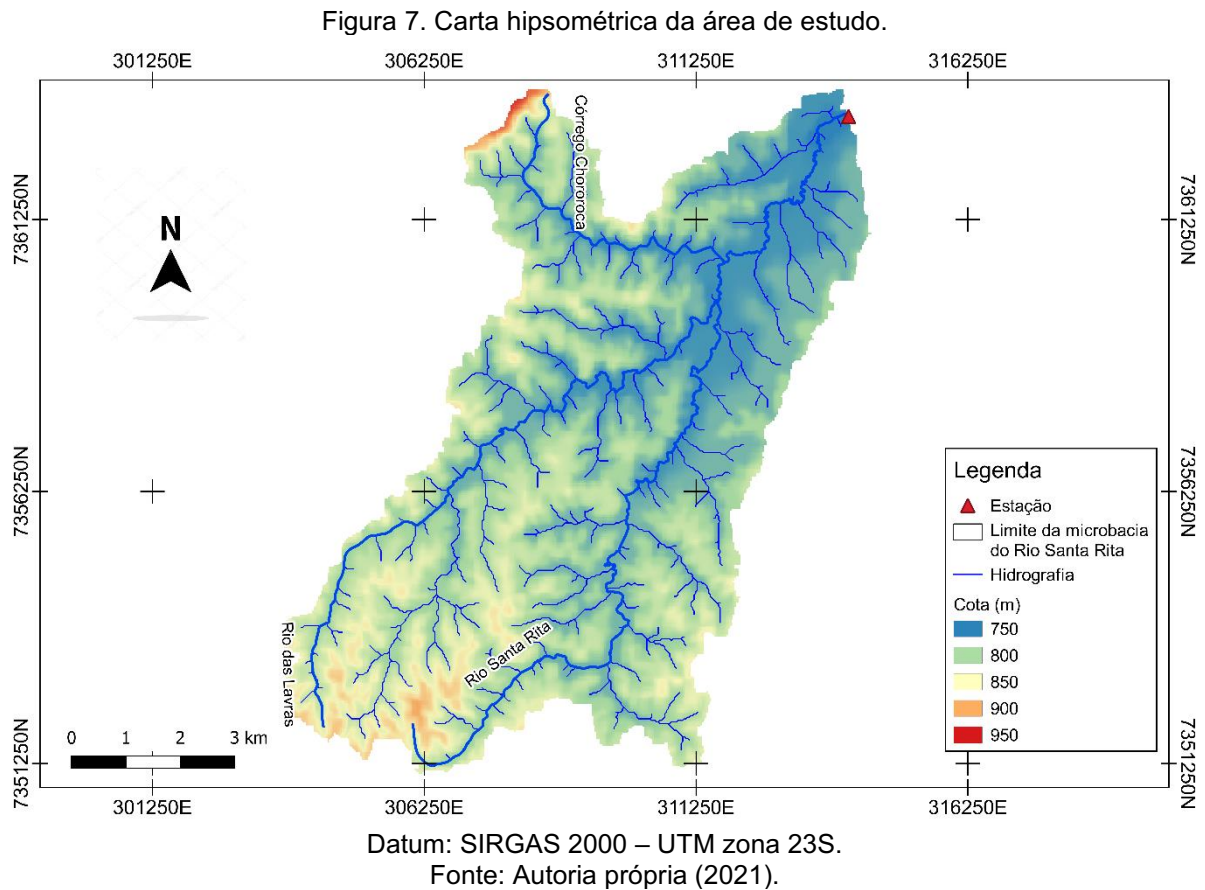
A Figura 6 representa a variabilidade da evapotranspiração na área da bacia com resolução temporal de 8 dias e espacial de 500 m, obtidas pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) do projeto EOS (*Earth Observing System*).

Figura 6. Evapotranspiração média da bacia para o período de 2008 a 2013 (a) e 2013 a 2018 (b).



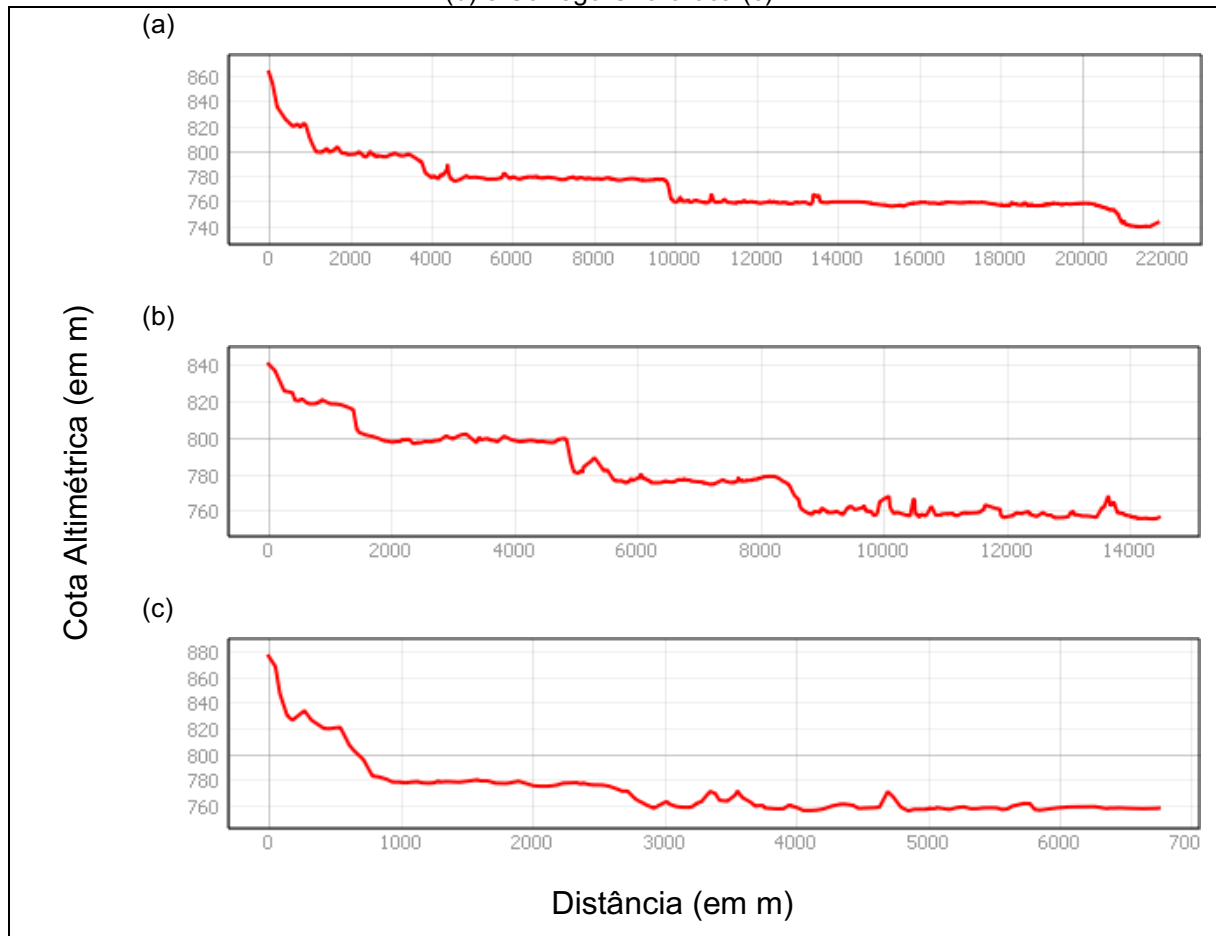
Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 7 demonstra a carta hipsométrica, que indica a variação altimétrica em toda a extensão da área de estudo, conforme bacia delimitada a partir do SWAT. As altitudes variam entre 750 metros e 950 metros.



A Figura 8 apresenta a variação altimétrica ao longo das três principais calhas da bacia, o rio Santa Rita que possui 21,959 km, o rio das Lavras com 14,479 km e o córrego Chororoca com 6,754 km de extensão, com destaque para as altitudes das suas nascentes, variando entre 840 e 880 m de altitude.

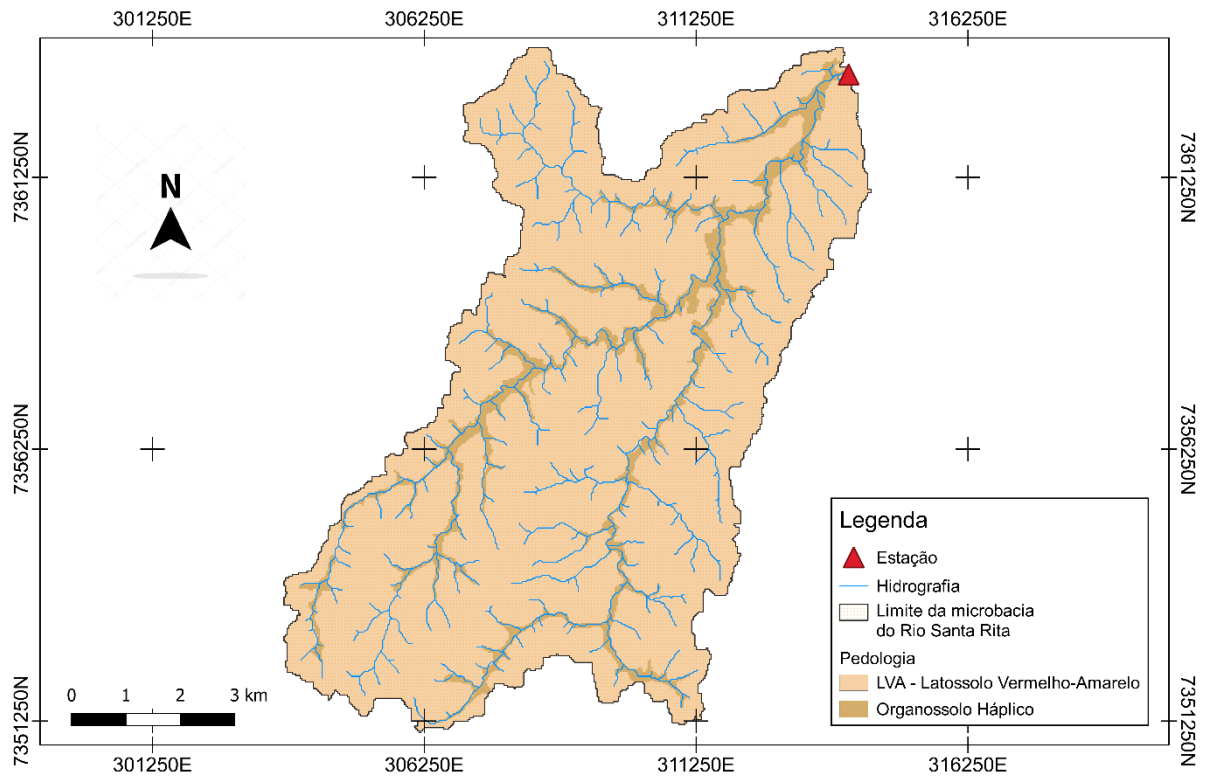
Figura 8. Perfil topográfico das calhas principais da bacia, rio Santa Rita (a), Rio das Lavras (b) e Córrego Chororoca (c).



Fonte: Autoria própria (2021).

Já a distribuição das classes de solo pela área de microbacia é representada pela carta da Figura 9. Nota-se que as áreas de ocorrência do Organossolo Háplico são predominantemente próximas aos leitos dos rios que formam a bacia, por serem naturalmente mais baixas e também por causa da grande quantidade de matéria orgânica que é transportada durante as chuvas e depositadas nestes locais (ALMEIDA; ZARONI; SANTOS, 2021).

Figura 9. Pedologia da microbacia do rio Santa Rita.



Datum: SIRGAS 2000 – UTM zona 23S.

Fonte: A autoria própria (2021).

As características hidrológicas dos solos observados na bacia são apresentadas na Tabela 5 e descrevem o comportamento da água no solo.

Tabela 5. Características hidrológicas dos solos da bacia.

Classe de solos	Grupo Hidrológico	Características
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Taxa mínima de infiltração: > 7,62 mm/h (TR-55, 1986)

Organossolo Háplico	C	solos contendo baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores com textura moderadamente fina. Taxa mínima de infiltração: 1,27-3,81 mm/h (TR-55, 1986)
---------------------	---	--

Fonte: Sartori; Neto; Genovez (2005) adaptado.

A Tabela 6 apresenta as características físico-químicas dos solos da bacia, estes valores foram obtidos junto ao Sistema de Informação de Solos Brasileiros – SiSolos (2020), incorpora amostras e perfis de solos de todo Brasil, apresentando uma descrição detalhada das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas desses perfis com suas localizações geográficas, sendo que o sistema contempla também dados de análises de fertilidade de solos.

Tabela 6. Parâmetros dos solos presentes na bacia.

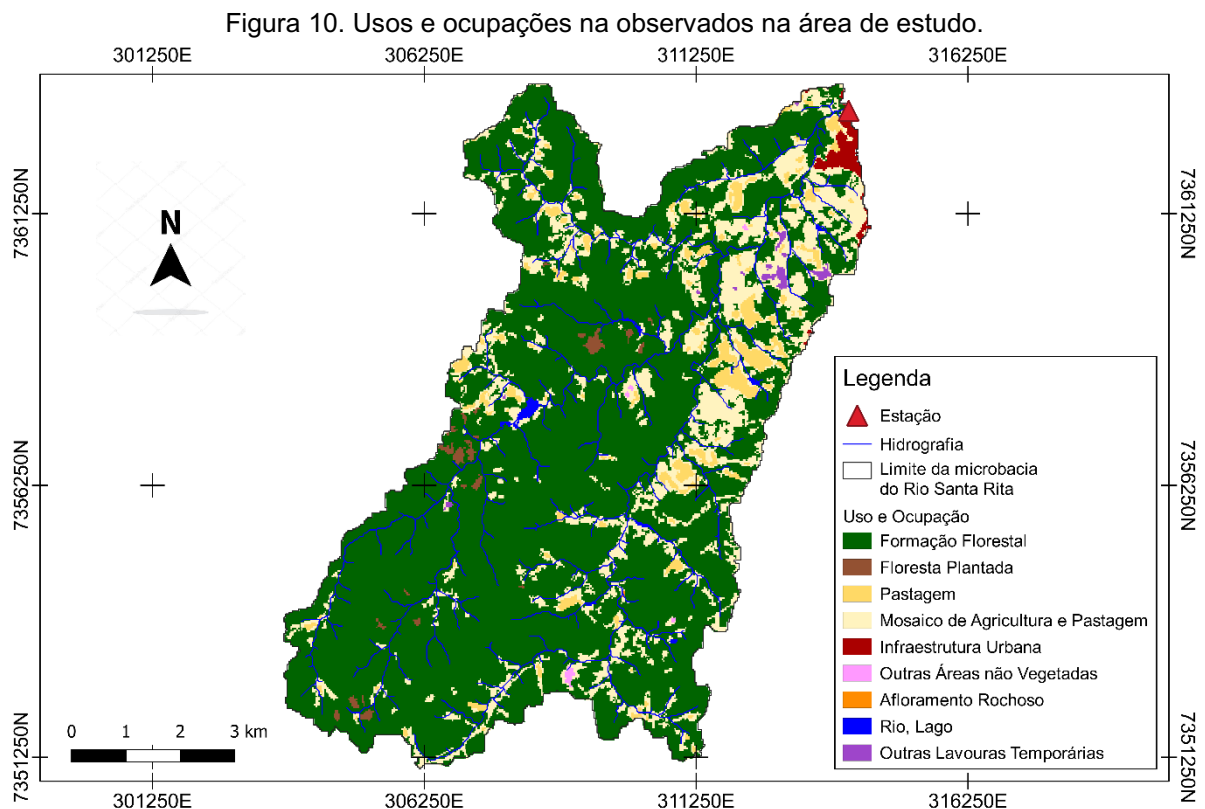
Solo	Profundidade (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Carbono Orgânico (g / Kg)	Área (Km ²)	%
Latossolo Vermelho-Amarelo	0 - 18	32,6	4,4	63,0	13,1	67,4718	90,46
	18 - 65	38,1	5,6	56,3	7,2		
	65 - 100	35,7	3,9	60,4	4,7		
	100 - 200	37,1	5,5	57,4	3,8		
	200 - 250	38,7	4,9	56,4	2,1		
	250 - 350	43,9	8,1	48,0	0,9		
	350 - 480	25,7	19,8	54,5	0,3		
Organossolo Háplico	0 - 25	63,7	23,1	13,2	201,4	7,1178	9,54
	25 - 35	82,5	11,7	5,8	115,9		
	35 - 45	52,6	15,3	32,1	213,7		
	45 - 57	60,9	23,3	15,8	252,6		
	57 - 58	42,4	17,9	39,7	238,8		
Total						74,5896	100,00

Fonte: SiSolos (2020) adaptado.

O Latossolo Vermelho-Amarelo, apresentado na Tabela 6, possui textura geral argilo-arenosa, que em geral favorece a drenagem devido a presença de microporos formados pela presença da argila, o Organossolo por sua vez apresenta

textura muito argilosa, mas devido ao alto nível de concentração de carbono orgânico sua drenagem é significativamente menor que a apresentada pelo Latossolo. Essa diferença em níveis de carbono orgânico se dá pelo carreamento dos sedimentos para as áreas mais baixas pelas chuvas, onde está localizado o Organossolo, geralmente nos leitos e margens dos leitos dos rios da bacia ou áreas mais baixas.

A área da bacia conta com diversos usos e ocupações, conforme visto na Figura 10, com predomínio de áreas florestadas sendo ainda possível observar outras atividades como agricultura (florestas plantadas e outras formas agriculturas), pecuária (com áreas de pastagem), ocupação urbana e pequenos afloramentos rochosos, conforme especificado na Tabela 7 (PROJETO MAPBIOMAS, 2020). Além disso a área ocupada por lagos ou represas representa cerca de 0,29% da área total da bacia.



Datum: SIRGAS 2000 – UTM zona 23S.

Fonte: MapBiomias (2021) adaptado.

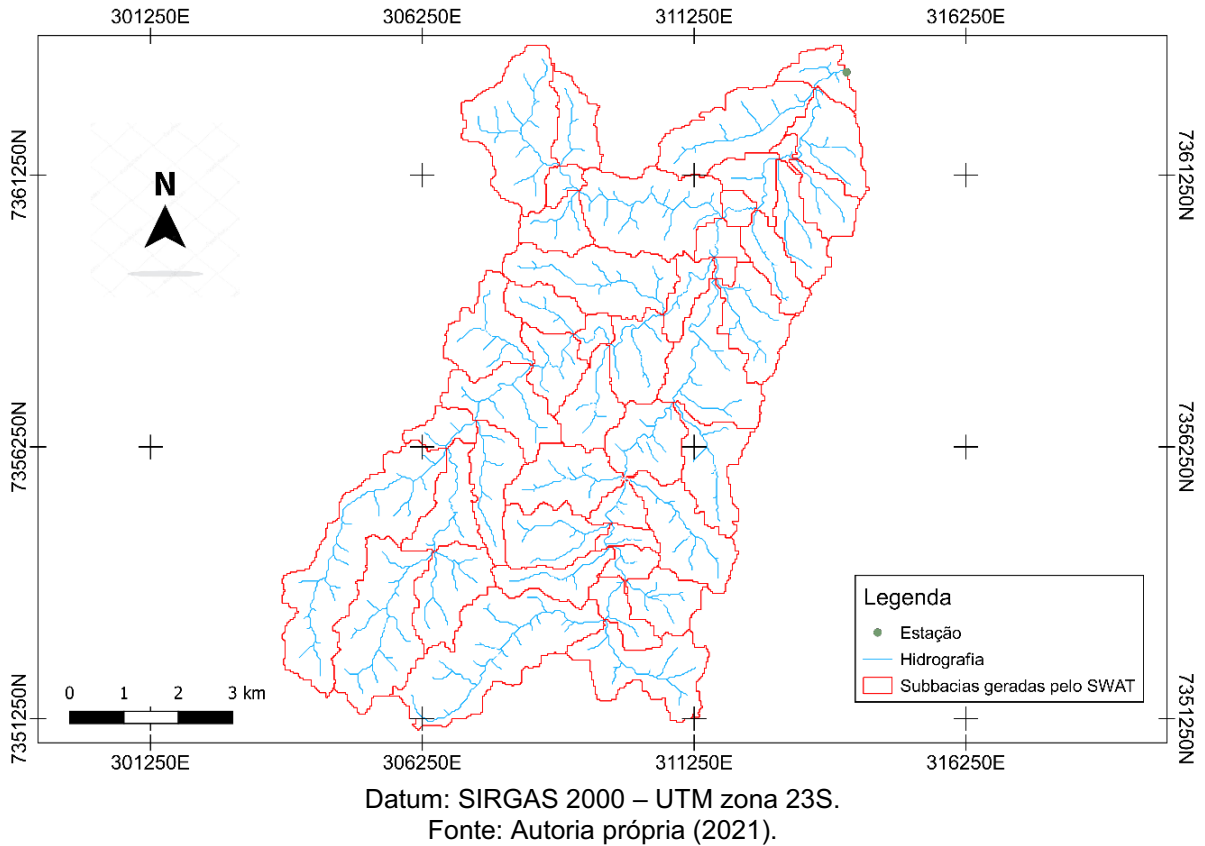
Tabela 7. Área e percentual ocupados por cada classe na bacia.

Classe	Área (km ²)	%
Formação Florestal	57,7329	77,60
Floresta Plantada	0,4563	0,61
Pastagem	2,6481	3,56
Mosaico de Agricultura e Pastagem	12,5419	16,86
Infraestrutura Urbana	0,5140	0,69
Outras Áreas não Vegetadas	0,0639	0,09
Afloramento Rochoso	0,0081	0,01
Rios, Lagos	0,2151	0,29
Outras Lavouras Temporárias	0,2142	0,29
Total	74,3946	100,00

Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com Zhang, Srinivasan e Bosch, (2009), o SWAT divide a bacia objeto de estudo em sub-bacias conectadas pela rede de drenagem e delinea as URHs com base em combinações únicas de classes de solo, declividade e cobertura do solo. As URHs são normalmente definidas agregando o uso da terra, tipo de solo e, opcionalmente, características de declive em uma determinada sub-bacia com base em limites definidos pelo usuário para cada categoria (KALCIC; CHAUBEY; FRANKENBERGER, 2015). Através do delineamento automático foram geradas 3965 URHs e estas foram agrupadas em 47 sub-bacias, conforme apresentado pela Figura 11.

Figura 11. Sub-bacias geradas automaticamente pelo SWAT.



Após a elaboração das URHs a partir das variáveis físicas, foram acrescentados os dados climáticos, conforme demonstrado pelas Figuras 12, 13, 14, 15 e 16.

Figura 12. Série temporal da variação da temperatura máxima e mínima.

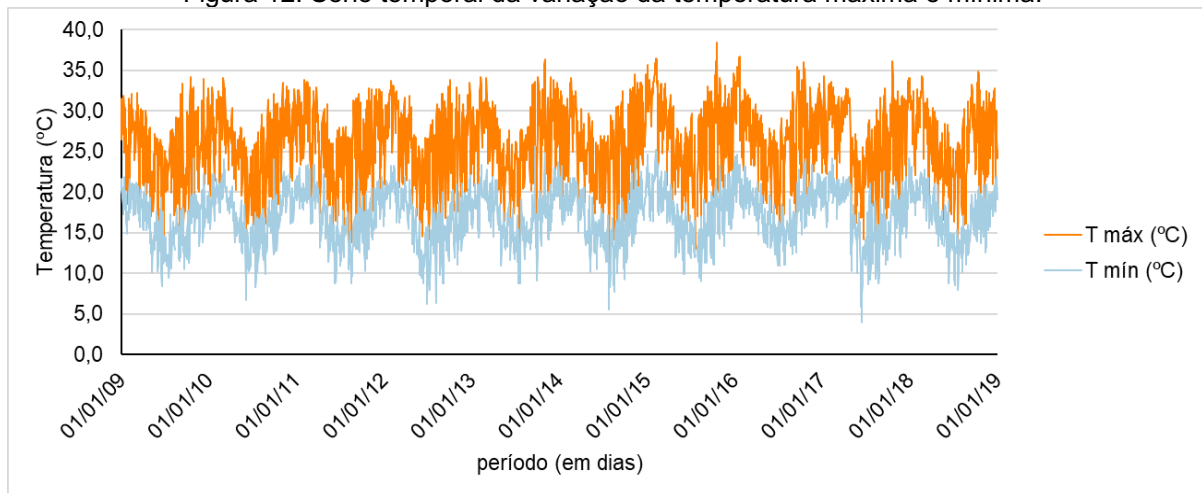
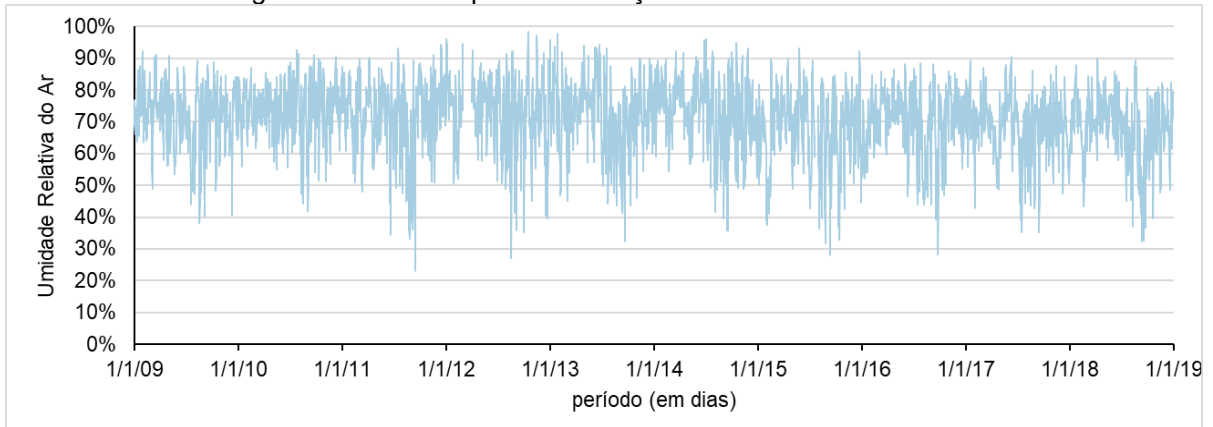
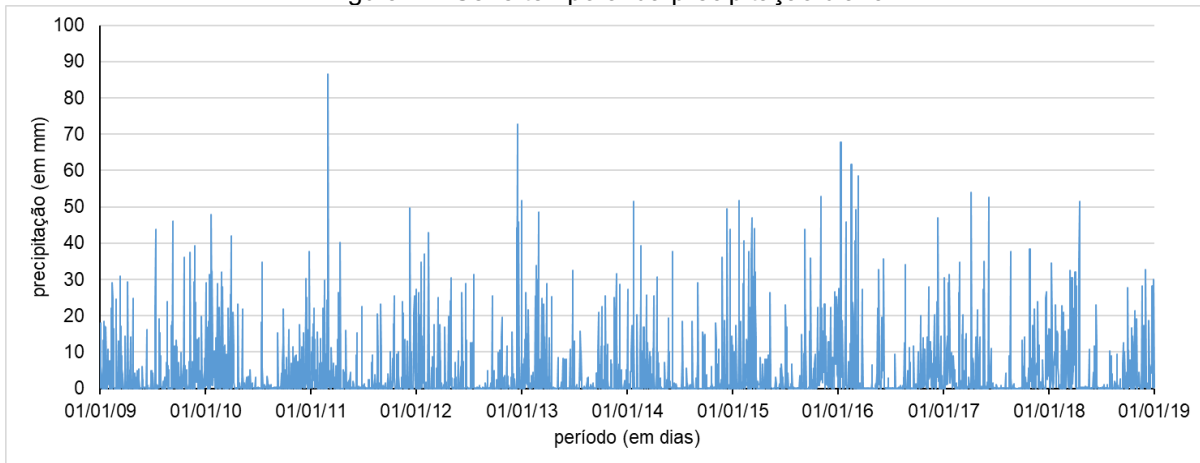


Figura 13. Série temporal da variação da umidade relativa do ar.



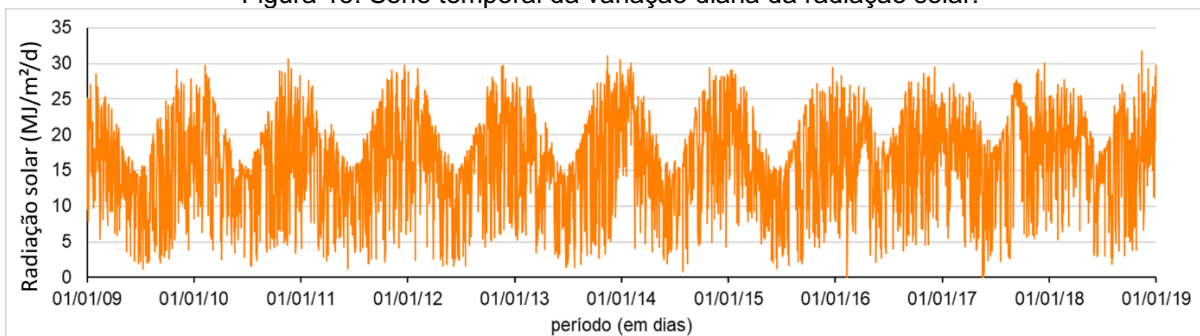
Fonte: BDMEP – INMET adaptado (2021).

Figura 14. Série temporal da precipitação diária.



Fonte: SABESP adaptado (2021).

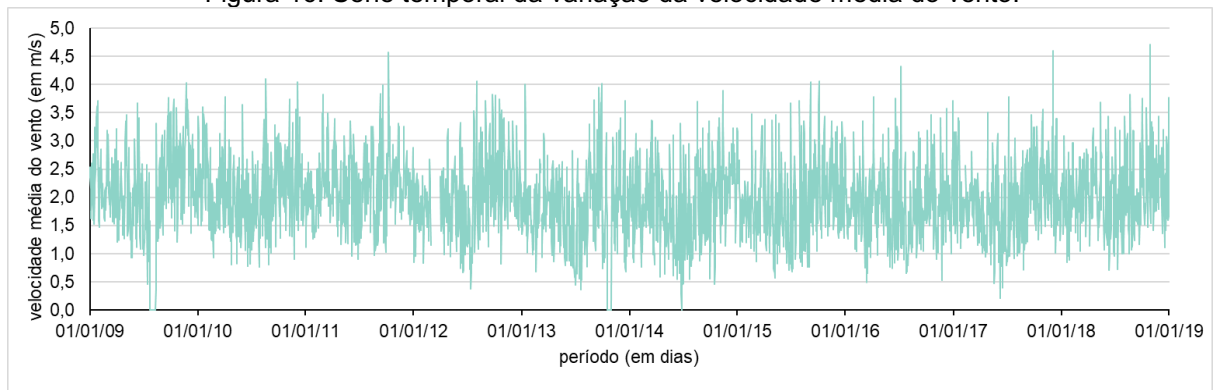
Figura 15. Série temporal da variação diária da radiação solar.



Fonte: BDMEP – INMET adaptado (2021).

Na Figura 15 são apresentados dados de radiação solar global diária, não havendo valores negativos, apenas com a falta de dados em determinados dias. Para a Figura 16 as interrupções observadas são oriundas de falta de dados para os respectivos dias.

Figura 16. Série temporal da variação da velocidade média do vento.



Fonte: BDMEP – INMET adaptado (2021).

A simulação gerada pelo SWAT para o período de 01/01/2009 a 31/12/2013 foi utilizada para realizar as tentativas de ajustes dos parâmetros do modelo. Após diversas tentativas (Tabela 8), chegou-se ao melhor ajuste (número 8). A partir deste ajuste, foram simulados dados de vazão para o período de validação, de 01/01/2014 a 31/12/2018.

Tabela 8. Valores adotados nas tentativas de ajustes dos parâmetros e valor da Soma de Quadrado dos Resíduos (SQR) obtido.

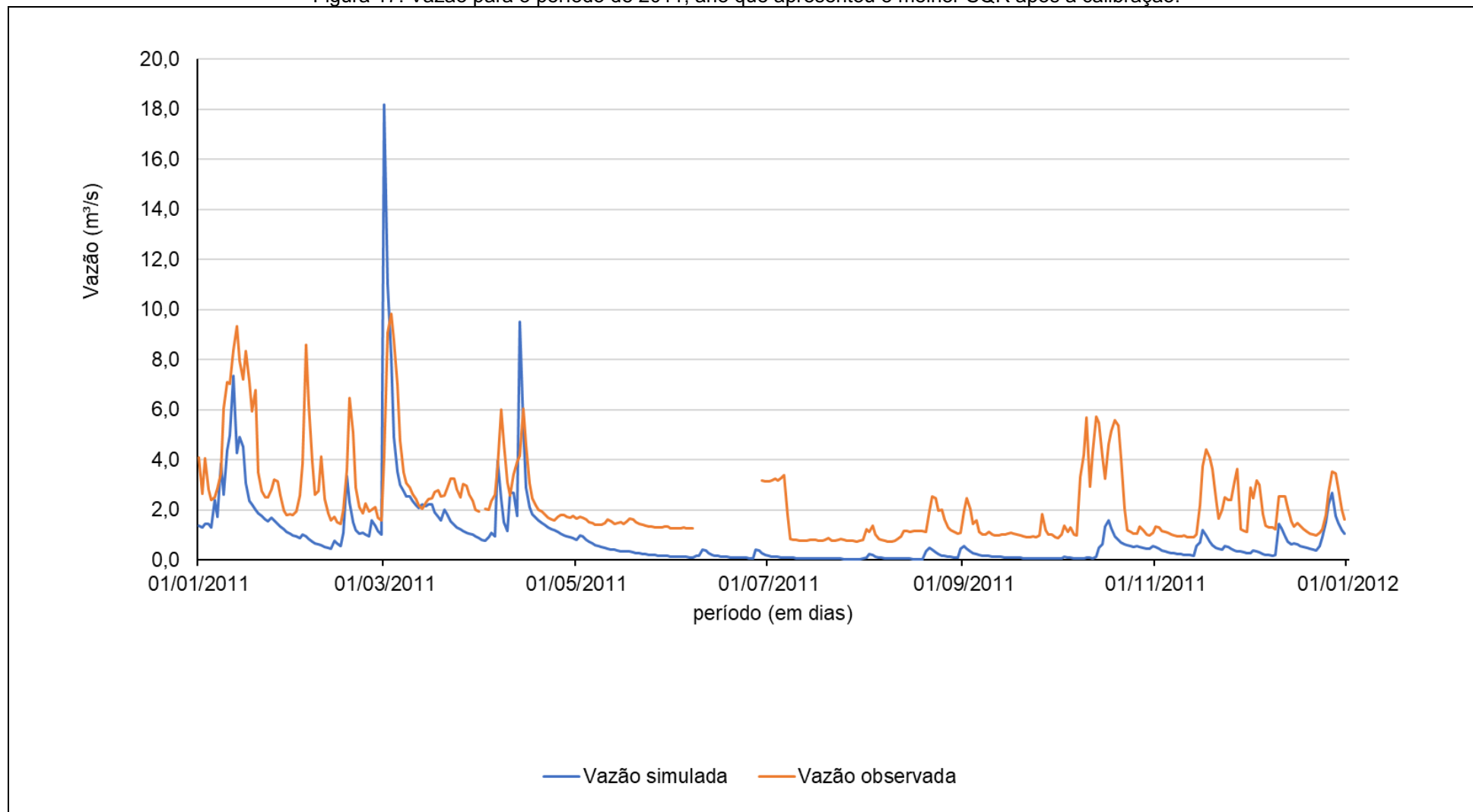
Ajuste	Parâmetro	valor	SQR	Ajuste	Parâmetro	valor	SQR
1	cn2	-75	6,57508	5	cn2	-95	6,45854
	awc	50			awc	95	
	surlag	-30			surlag	-95	
	esco	-15			esco	75	
	revap_co	10			revap_co	90	
	revap_min	10			revap_min	90	
	slope	10			slope	50	
	ovn	10			ovn	75	
	slopelen_l	-10			slopelen_l	-85	
2	cn2	-75	6,64517	6	cn2	-95	6,81657
	awc	75			awc	95	
	surlag	-40			surlag	-95	
	esco	-20			esco	-75	
	revap_co	25			revap_co	90	
	revap_min	25			revap_min	90	
	slope	20			slope	50	
	ovn	20			ovn	-75	
	slopelen_l	-25			slopelen_l	85	
3	cn2	-85	6,45854	7	cn2	-95	5,69747
	awc	85			awc	95	
	surlag	-50			surlag	95	
	esco	20			esco	-25	
	revap_co	50			revap_co	95	
	revap_min	50			revap_min	95	
	slope	30			slope	75	
	ovn	35			ovn	75	
	slopelen_l	-35			slopelen_l	-95	
4	cn2	-90	6,45854	8	cn2	-95	5,69747
	awc	95			awc	95	
	surlag	-80			surlag	-95	
	esco	50			esco	90	
	revap_co	75			revap_co	95	
	revap_min	75			revap_min	95	
	slope	30			slope	25	
	ovn	50			ovn	50	
	slopelen_l	-65			slopelen_l	-95	

Fonte: Autoria própria (2021).

Desta forma o valor da SQR passou a ser de 5,6975, cerca de 12% menor que antes dos ajustes, indicando melhora no resultado das simulações. Apesar de grande este desvio, a redução em comparação ao desvio do período sem calibração demonstra que os ajustes afetaram de forma positiva o modelo, bem como o indicado por Kuwajima (2012) em seu estudo, onde testou diferentes ajustes para encontrar a melhor calibração.

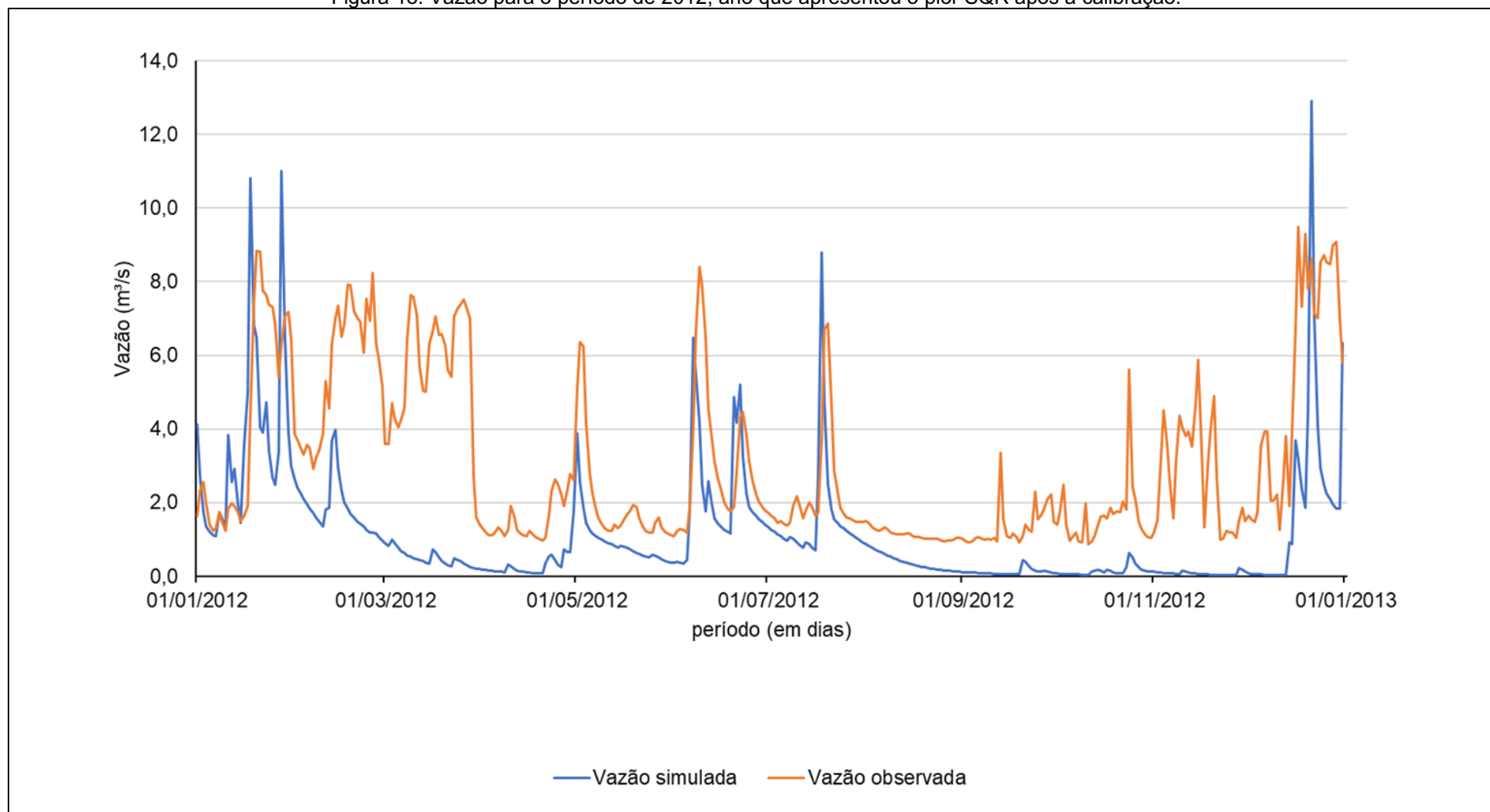
Analisando as Figuras 17 e 18 foi possível verificar que a simulação após a calibração foi capaz de descrever o comportamento geral do rio Santa Rita com precisão máxima no ano de 2011 e pior desempenho observado no ano de 2012, com os valores de SQR de 3,8378 e 7,8878, respectivamente. As quebras de linhas observadas são provenientes da falta de dados naquele dia ou período. Porém o modelo subestimou os valores da vazão, reduzindo-a significativamente, um problema semelhante ao apresentado por Kuwajima (2012).

Figura 17. Vazão para o período de 2011, ano que apresentou o melhor SQR após a calibração.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 18. Vazão para o período de 2012, ano que apresentou o pior SQR após a calibração.



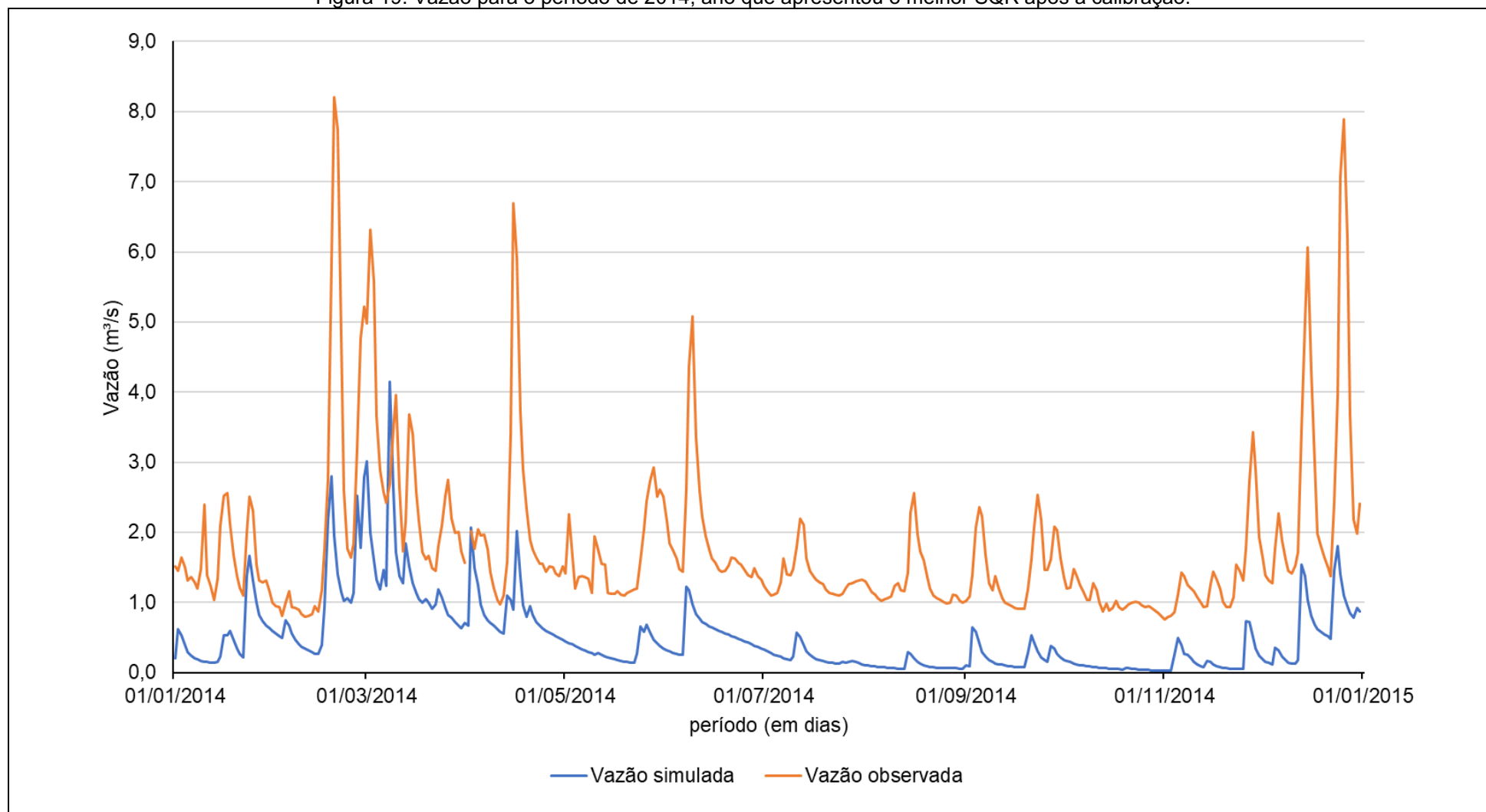
Fonte: Autoria própria (2021).

Quando se utiliza o método de classificação de desempenho de Nash-Sutcliffe - NSE (NASH; SUTCLIFFE, 1970), por sua vez, demonstra que os resultados para o período de 2009 a 2013 foi considerado insatisfatório, uma vez que este modelo obteve valor de $NSE = -0,3118$, sempre que $NSE < 0,50$.

Após a calibração é necessária a validação do modelo, desta forma foram feitas simulações para o período de 01/01/2014 a 31/12/2018.

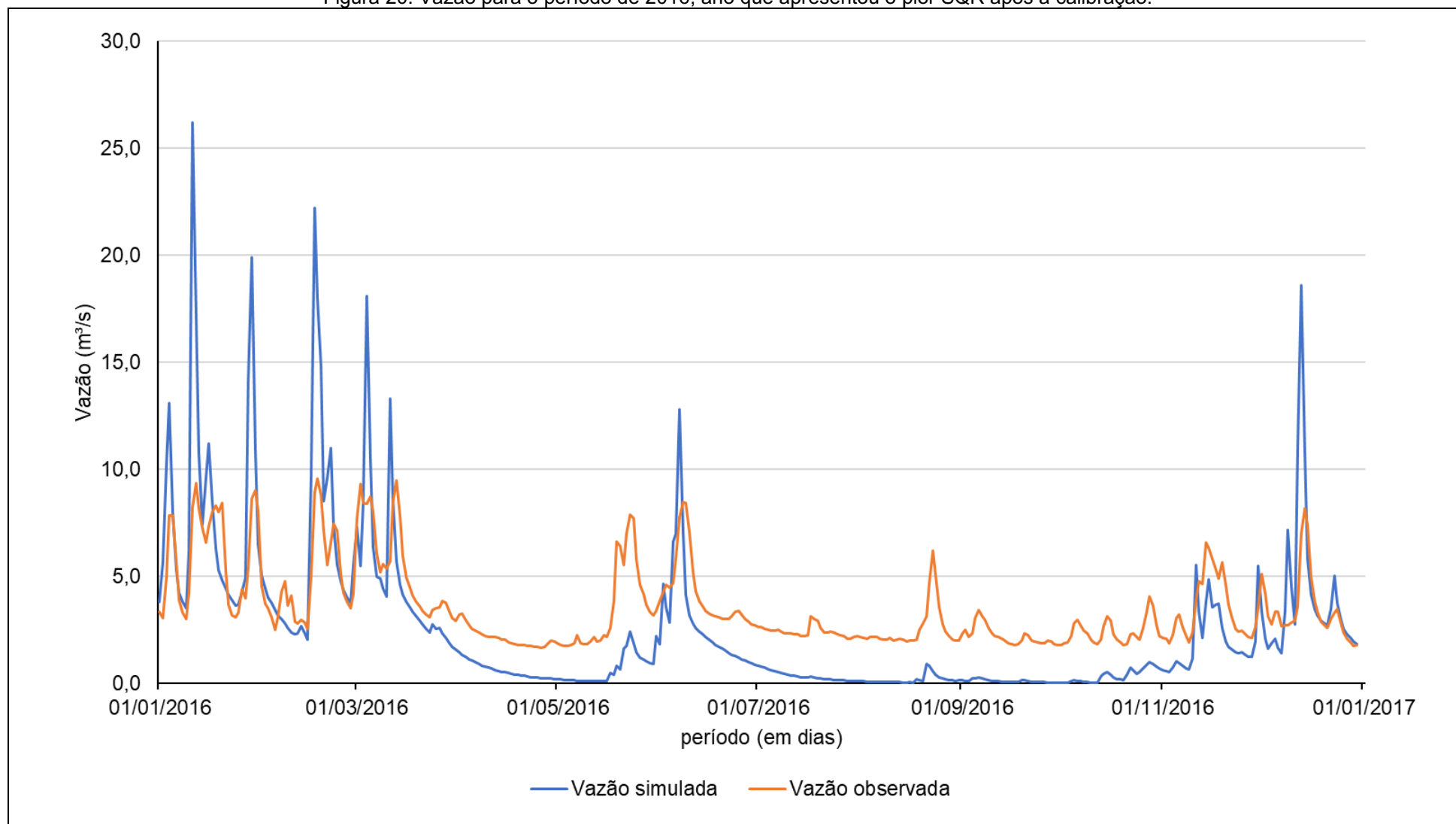
Para o período de validação do modelo, o melhor resultado conforme SQR, foi o ano de 2014, que apresentou SQR igual a 2,4827 (Figura 19). O modelo gerado demonstrou graficamente o comportamento da vazão da bacia neste período, contudo voltou a subestimá-la.

Figura 19. Vazão para o período de 2014, ano que apresentou o melhor SQR após a calibração.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 20. Vazão para o período de 2016, ano que apresentou o pior SQR após a calibração.

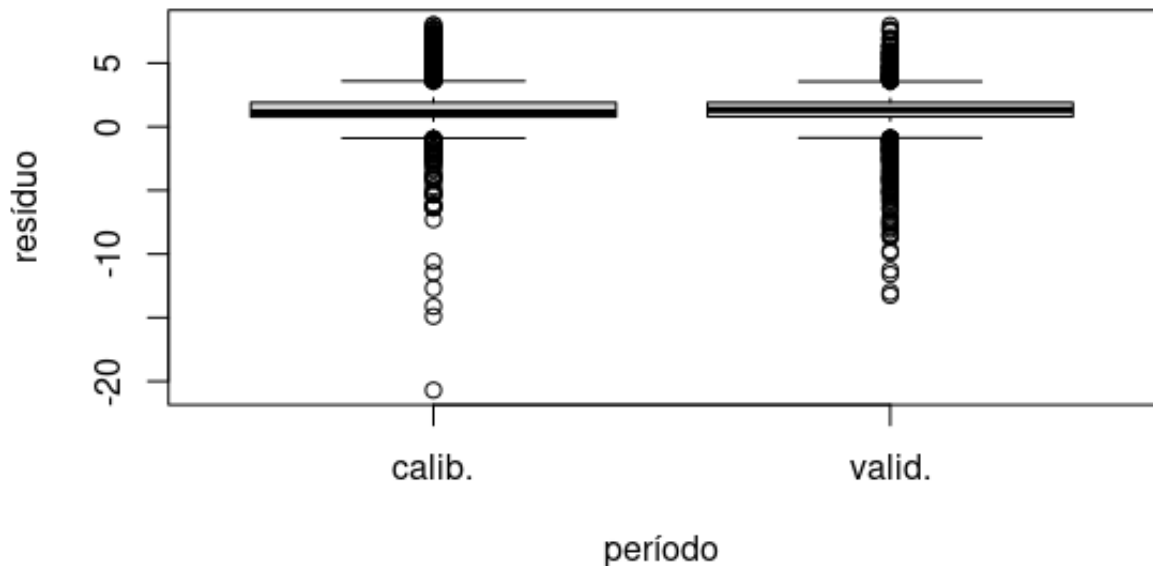


Fonte: Autoria própria (2021).

O pior ano do período de validação foi 2016, com SQR igual a 7,5194. Em alguns momentos notou-se picos extremos de vazão na simulação que não ocorreram na realidade (Figura 20). Quando se observa o índice de NSE para o período de 2014 a 2018, chegou-se a um resultado de -0,6105, indicando que o modelo foi insatisfatório para este período.

Ao analisar estatisticamente os dados por meio do diagrama de caixa ou *boxplot*, pode-se notar na Figura 21 a maior variação de *outliers* dos dados de resíduos para o período de calibração quando comparado aos dados de resíduos do período de validação.

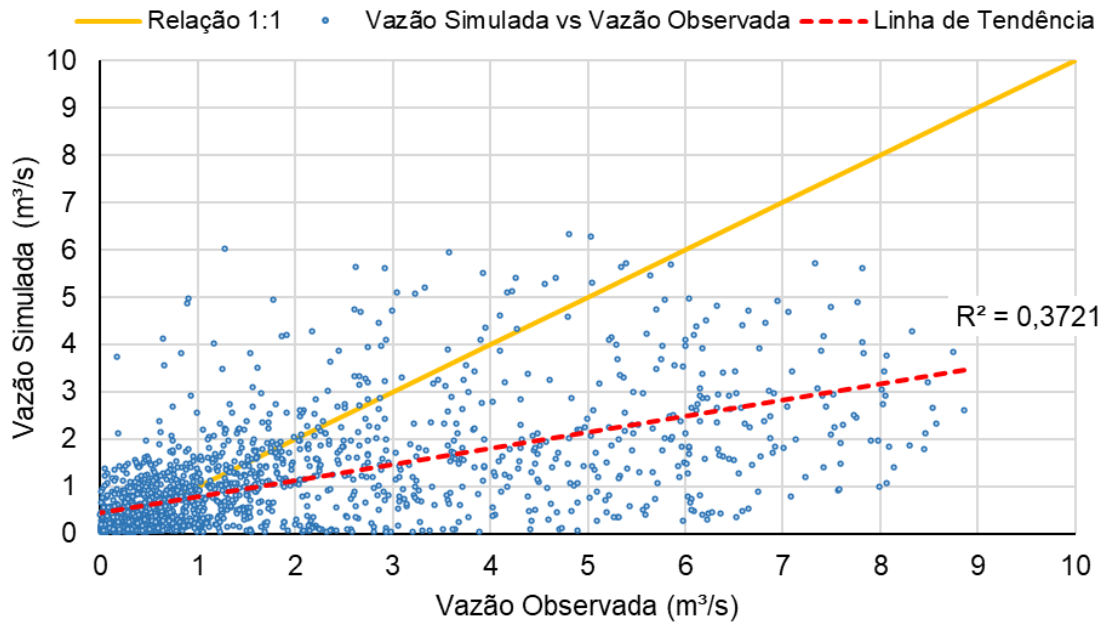
Figura 21. Boxplot dos resíduos das simulações dos períodos de calibração e validação.



Fonte: Autoria própria (2021).

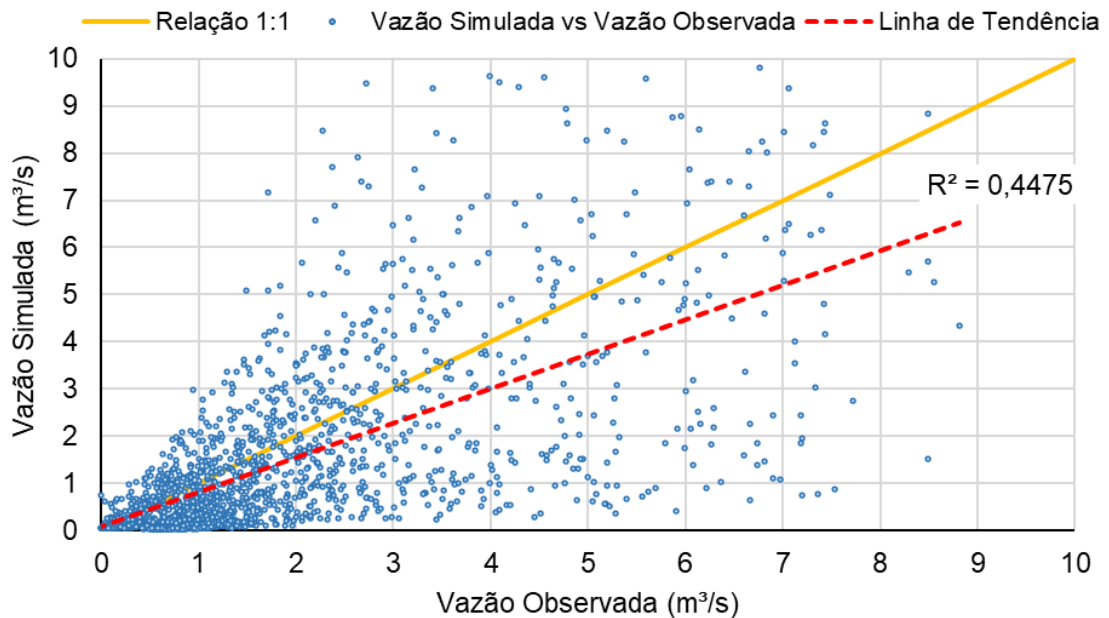
Para verificar o impacto dos *outliers* sobre o modelo, os valores que excediam a média mais o desvio padrão em três vezes foram desconsiderados. Tendo como base esses dados foram determinados os valores de R^2 , conforme Figuras 22 e 23.

Figura 22. Relação entre a vazão observada e a vazão simulada ajustada para o período de 2009 a 2013.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 23. Relação entre a vazão observada e a vazão simulada ajustada para o período de 2014 a 2018.



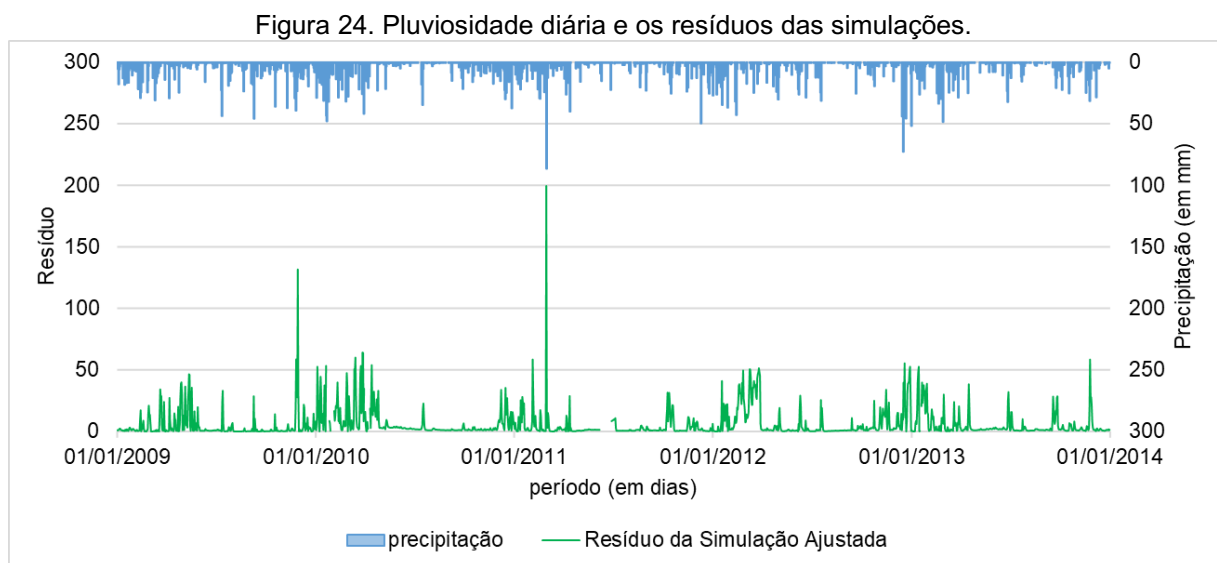
Fonte: Autoria própria (2021).

Ao avaliar os dados do período de calibração (Figura 22), nota-se uma menor inclinação da linha de tendência, se distanciando da linha de relação 1:1, bem como seu $R^2 = 0,3721$ apresenta potencial de explicação de cerca de 37% de toda esta

variação, o que demonstra uma menor relação entre os dados observados e simulados quando comparada a Figura 23.

Porém quando se desconsideram os *outliers* da vazão simulada para período de validação (Figura 23), é possível notar que o modelo se ajusta com maior precisão, $R^2 = 0,4475$, cerca de 45% potencial de explicação da variação, bem como há uma maior proximidade entre as linhas de tendência e de relação 1:1.

As discrepâncias dos dados simulados podem estar relacionadas aos picos de pluviosidade, que tornam difícil para os modelos preverem a vazão desses altos volumes de chuva na bacia hidrográfica. Isso ocorre principalmente porque há apenas uma estação pluviométrica na área da bacia de estudo e uma grande possibilidade de que um pico de precipitação não ocorra de forma homogênea em toda a bacia, embora na simulação essa situação seja assim representada, justamente devido à ausência de dados em outros pontos da bacia. Quando se observa a Figura 24, pode-se verificar que há dois momentos que geraram altos níveis de resíduos, ou seja, altos desvios em relação os valores medidos de vazão.



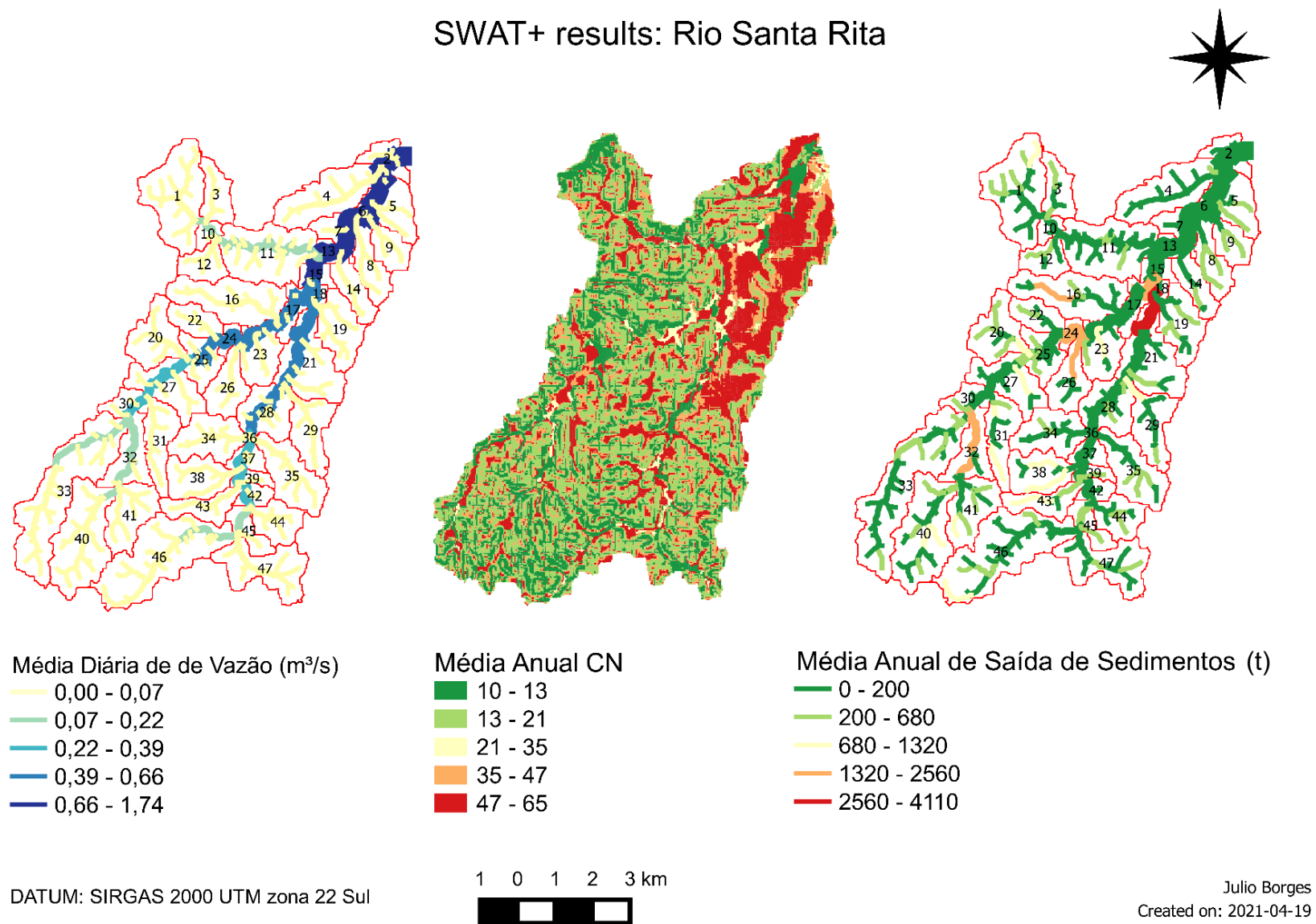
Fonte: Autoria própria (2021).

A associação de altos picos de pluviosidade com dados climáticos de uma estação de monitoramento relativamente distante, mesmo sendo a mais próxima disponível, e a qualidade dos dados de solo, uso e ocupação podem ser parte dos fatores que causam esses desvios extremos de vazão.

De forma geral o modelo é capaz de lidar com as variações de precipitação gerando baixos resíduos, o que demonstra a robustez e a complexidade dos cálculos realizados durante as simulações.

O conjunto de mapas da Figura 25 demonstra as regiões onde há maior índice de escoamento superficial e maiores volumes de carreamento de sedimentos pelos corpos hídricos.

Figura 25. Média diária de vazão, índice de escoamento superficial e média anual de transporte de sedimentos.



Fonte: Autoria própria (2021).

De posse desse tipo de informação, os gestores podem verificar áreas com maior susceptibilidade a erosão causado pelo escoamento superficial e assim determinar quais as melhores técnicas de mitigação para este problema por exemplo. No caso dessa bacia, o carreamento de sedimentos é particularmente problemático, pois trata-se de uma bacia produtora de água, que abastece um dos maiores sistemas de abastecimento de água da RM de São Paulo.

6 CONCLUSÕES

O modelo SWAT mostra-se como uma ferramenta altamente versátil e capaz de fornecer dados robustos para tomadas de decisão em diversas análises ambientais, principalmente quando fala-se na dinâmica temporal.

Problemas de bancos de dados podem ocorrer devido à baixa infraestrutura de tais sistemas no país, o que de certa forma dificultam a elaboração de modelos, principalmente por uma falta de estações de monitoramento com séries históricas completas e espalhadas de forma igual pelo país. Os dados obtidos para este trabalho apresentaram poucas falhas ou registros ausentes, o que é fundamental para criação de um banco de dados completo que melhorará a qualidade do modelo gerado. Por sua vez, os dados físicos de solos e usos são mais variados e de fácil acesso.

De forma geral o modelo gerado mostrou-se insatisfatório, mesmo apresentando o comportamento geral da vazão observada, em especial por subestimá-la. Após os devidos ajustes para o período de 2014 a 2018 apresentou uma SQR de 5,2724 e um NSE de -0,6105. Por falta de compatibilidade dos softwares utilizados não foram determinadas quais variáveis mais influenciaram neste modelo, ficando como recomendação para uma análise futura a realização desta verificação.

Por fim, considerou-se que o modelo gerado para a bacia do rio Santa Rita foi insatisfatório, com aspectos a serem melhorados, tais como: uma ampliação da área para abranger uma bacia maior e com isso possibilitar a utilização de um número maior de estações que representem bem a variação espacial seria uma possibilidade de continuação deste trabalho.

Em futuros trabalhos recomenda-se determinar quais variáveis mais influenciaram neste modelo e explorar a dinâmica de sedimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C. *et al.* A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 524, p. 733–752, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- ABBASPOUR, K. C. *et al.* Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 333, n. 2–4, p. 413–430, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Caderno de Capacitação de Recursos Hídricos - O Comitê de Bacia Hidrográfica o que é e o que faz?** Brasília: [s. n.], 2011. v. 1
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2019. *E-book*.
- ALMEIDA, E. de P. C.; ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. dos. **Solos Tropicais: Organossolos Háplicos**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn362j9z02wx5ok0liq1mq8uzht6c.html. Acesso em: 30 mar. 2021.
- ALMEIDA, R. A.; PEREIRA, S. B.; PINTO, D. B. F. Calibration and validation of the swat hydrological model for the mucuri river basin. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 55–63, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n1p55-63/2018>. Acesso em: 5 dez. 2019.
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 69–76, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100010>. Acesso em: 17 jun. 2020.
- ARNOLD, J. G. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- BATISTA, L. F. A. **Modelagem espaço-temporal do crescimento de macrófitas submersas**. 194 f. 2011. - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Presidente Prudente - SP, 2011.
- BRIGHENTI, T. M. **Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT**. 116 f. 2015. - Universidade Federal De Santa Catarina, [s. l.], 2015.
- BROOKS, K. N.; FFOLLIOTT, P. F.; MAGNER, J. A. **Hydrology and the Management of Watersheds**. 4th ed.ed. Oxford, UK: Wiley-Blackwell Publishing Ltd., 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118459751>
- CAMBIEN, N. *et al.* Using the Soil and Water Assessment Tool to Simulate the

Pesticide Dynamics in the Data Scarce Guayas River Basin, Ecuador. **Water**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 696, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12030696>

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. 154 f. 2014. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2014.

CARVALHO, S. M. **O diagnóstico físico-conservacionista –dfc como subsídio à gestão ambiental da bacia hidrográfica do rio Quebra-Perna, Ponta Grossa – PR**. 183 f. 2004. - Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/105051>

CASTRO, K. B. de. **Avaliação do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. 122 f. 2013. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2013.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia Para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. 6. ed. [S. l.]: IPH UFRGS, 2008.

EMPLASA - EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. **Região Metropolitana de São Paulo**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://emplasa.sp.gov.br/RMSP>. Acesso em: 10 jul. 2020.

FERNANDES, J. G.; GALVÍNCIO, J. D.; SANTOS, M. B. G. dos. O modelo SWAT e suas possibilidades de aplicações em apl agrícolas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 115–126, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5.1.p115-126>. Acesso em: 26 set. 2020.

FREIRE, C. C.; OMENA, S. P. F. **Princípios de Hidrologia Ambiental**. Brasil: Agência Nacional de Águas - ANA, 2005. Apostila.

FUJITA, T. **Calibração e validação de um modelo hidrológico para a bacia do rio Ivaí**. 128 f. 2018. [s. l.], 2018.

GASSMAN, P. W. *et al.* The Soil And Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, And Future Research Directions Invited Review Series. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GENOVEZ, A.; NETO, F.; SARTORI, A. 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**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>

GHIMIRE, U. *et al.* A Review of Ongoing Advancements in Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for Nitrous Oxide (N₂o) Modeling. **Atmosphere**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 450, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11050450>

GONÇALVES, T. D. Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2007. 88p.

GUEVARA-OCHOA, C.; MEDINA-SIERRA, A.; VIVES, L. Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 722, p. 137886, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137886>

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 25 out. 2020.

INPE, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. [S. l.], 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 1 out. 2020.

JACOBI, P. R.; EMPINOTTI, V. L.; SCHMIDT, L. Water Scarcity and Human Rights. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 19, n. 1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoceditorialv19i2016>

KALCIC, M. M.; CHAUBEY, I.; FRANKENBERGER, J. Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 1–12, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.951>

KUWAJIMA, J. I. **Análise do Modelo Swat como Ferramenta de Prevenção e de Estimativa de Assoreamento do Reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. 158 f. 2012. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2012.

LIMA, A. J. R.; NERY, J. T. Revisitando o conceito de bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão e a governança das águas. *In*: OS DESAFIOS DA GEOGRAFIA FÍSICA NA FRONTEIRA DO CONHECIMENTO. Presidente Prudente: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. v. 36, p. 726–738. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1846>

MAMÉDIO, F.; CASTRO, N.; CORSEUIL, C. Tempo de concentração para Bacias Rurais Monitoradas na Região do Planalto Basáltico no Sul do Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 17, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rega.v15e1>

MARTINS, L. L. *et al.* Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 13, n. 02, p. 576–594, 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.

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

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil & Water Assessment Tool (SWAT)**. [S. l.: s. n.], 2009.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. [S. l.: s. n.], 2011.

NOVAIS, M. P. S. Análise Espacial de Bacias Hidrográficas a partir de SIG: um estudo da Bacia Hidrográfica do Itapicuru-Bahia. *In:* , 2015, João Pessoa. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. João Pessoa: [s. n.], 2015. p. 2719–2726.

OKI, T.; KANAE, S. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. **Science**, [s. l.], v. 313, n. 5790, p. 1068–1072, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1128845>. Acesso em: 8 jun. 2020.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Modelagem Dinâmica. *In:* DRUCK, S. *et al.* (org.). **MODELAGEM DINÂMICA E GEOPROCESSAMENTO**. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 1–39. *E-book*.

Porto, R. L. L.; Azevedo, L. G. T. Sistemas de suporte a decisões de recursos hídricos. *In:* Porto, R. L. L. Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídrico. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1997. cap.2, p.43-95.

Projeto MapBiomias – Coleção 4.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em 20 de novembro de 2020 através do link: <https://mapbiomas.org/google-earth-engine>

RESCHILIAN, P. R.; BEVILACQUA, A. F. A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE TERRITORIAL DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. *In:* , 2012, Belém. **VI Encontro Nacional da ANPPAS**. Belém: [s. n.], 2012. p. 1–4.

ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado | Instituto Florestal**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/2017/09/mapa-pedologico-do-estado-de-sao-paulo-revisado-e-ampliado/>. Acesso em: 23 set. 2020.

SANTOS, C. L. dos *et al.* Impactos Da Urbanização Em Bacias Hidrográficas: O Caso Da Bacia Do Rio Jaguaribe, Cidade De João Pessoa/Pb. **Revista de Geociências do Nordeste**, [s. l.], v. 2, p. 1025–1033, 2016.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5º Edição. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, W. L. dos. **O Processo De Urbanização E Impactos Ambientais Em Bacias Hidrográficas: O Caso Do Igarapé Judia-Acre-Brasil**. 2005. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE, Rio Branco, 2005. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp095465.pdf>. Acesso em: 26 set. 2020.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>. Acesso em: 30 mar. 2021.

SCHUSSEL, Z.; NASCIMENTO NETO, P. Gestão Por Bacias Hidrográficas: Do Debate Teórico À Gestão Municipal. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 137–152, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC838V1832015>

SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. (org.). **World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century**. Revised ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

SORIANO, É. *et al.* Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 21–42, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc150120r1v1912016>. Acesso em: 15 abr. 2021.

SOUZA, R. M. de; SANTOS, I. dos; KOBAYAMA, M. O Modelo Swat Como Ferramenta Para a Gestão de Recursos Hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. *In:* , 2009, Campo Grande. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande: ABRH, 2009. p. 1–14. Disponível em: [http://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/ARTI_2009/Souza et al \(2009 ABRH\) SWAT.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/ARTI_2009/Souza et al (2009 ABRH) SWAT.pdf). Acesso em: 26 set. 2020.

STIPP, N. A. F.; MENDONÇA, F. de A. Uma Abordagem Empírica Sobre a Fragilidade De Ambientes Naturais E Antropizados Na Área Da Bacia Hidrográfica Do Ribeirão Taquara, No Município De Londrina – Pr – Br. *In:* , 2010, Coimbra. **VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física**. Coimbra: [s. n.], 2010. p. 1–17. Disponível em: <http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/nilza>

TRENBERTH, K. E. *et al.* Estimates of the Global Water Budget and Its Annual Cycle Using Observational and Model Data. **Journal of Hydrometeorology**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 758–769, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM600.1>. Acesso em: 8 jun. 2020.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia Ciência E Aplicação**. 2º ed.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS, 2001.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>. Acesso em: 17 jun. 2020.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 55–64, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000100008>. Acesso em: 26 set. 2020.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology**. 4th ed. [S. l.]: Glenview, Ill. : Addison Wesley/Longman, 1995.

WAINWRIGHT, J.; MULLIGAN, M. (org.). **Environmental Modelling**. 2nd. ed. Chichester: Wiley, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118351475>

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; BOSCH, D. Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using genetic algorithms and Bayesian model averaging. **Journal of Hydrology**, v. 374, n. , p. 307-317, 2009.