



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.08.18.03-TDI

APLICAÇÃO DO SWAT NA MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Marcio Malafaia Filho

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, e Felipe Siqueira Pacheco, aprovada em 24 de maio de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TQD34L>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA N° 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.08.18.03-TDI

APLICAÇÃO DO SWAT NA MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Marcio Malafaia Filho

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, e Felipe Siqueira Pacheco, aprovada em 24 de maio de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TQD34L>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Malafaia Filho, Marcio.

Ma29a Aplicação do SWAT na modelagem hidrológica da bacia do rio
Paraíba do Sul / Marcio Malafaia Filho. – São José dos Campos :
INPE, 2019.

xxi + 53 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/08.08.18.03-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Dr. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, e Felipe
Siqueira Pacheco.

1. Modelagem hidrológica. 2. SWAT. 3. Sedimento.
4. Nutrientes. I.Título.

CDU 556.013(282.281.56)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Marcio Malafala Filho**

Título: "APLICAÇÃO DO SWAT NA MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Clência do Sistema Terrestre

Dra. Laura de Simone Borma

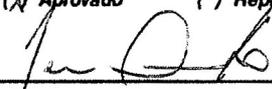


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado () Reprovado

Dr. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto

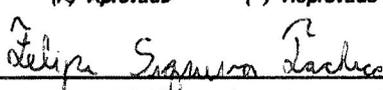


Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado () Reprovado

Dr. Felipe Siqueira Pacheco



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado () Reprovado

Dr. Carlos Eduardo de Rezende



Convidado(a) / UENF / Campos dos Goytacazes - RJ

(X) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado () Reprovado

Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu



Convidado(a) / UNIFEI / Itajubá - MG

() Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 24 de maio de 2019

“The powers that be, are you and me.”

Manufactured Extinct – Cattle Decapitation

À Terezinha Itagiba Rooke, um exemplo de vida e luta.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Rita e Márcio, o que sou hoje e eventualmente serei amanhã, é por vocês. À minha irmã Marta, meu eterno presente de dia da Criança. À Dra. Mayse Rooke, que me apoiou, amou e brigou em momentos importantes ou sem importância, em horas difíceis ou tempos mais fáceis, você esteve lá, muito obrigado. À Caroline também por dividir a sua família e o Thor comigo.

Ao Doutor Jean Ometto por todas as puxadas de orelha e incentivos. Ao Doutor Felipe Pacheco que em todos os momentos esteve presente, com toda paciência comigo, eu serei eternamente agradecido. Registre-se aqui que Felipe Pacheco será dos cientistas mais importantes de uma geração, caso isso não aconteça, errada a ciência.

Aos professores Carlos Eduardo Rezende e Marina Satika Suzuki da Universidade Estadual do Norte Fluminense pelos dados disponibilizados.

As amigas que o PGCST me proporcionou manter: Marcela Miranda, Camille Nolasco e Letícia Fonseca e aos novos amigos que a pós-graduação me trouxe: Lena, Eduardo, Eduardo, Marcos, Beta, Gislene, Sandro e a toda a turma do PGCST 2014.

Àqueles que nunca faltaram comigo hora nenhuma, minha tia Helô que me ensinou a chamá-la de tia e sempre que precisei atuou exatamente como uma boa tia faria. Ao Antônio, amigo sempre esteve presente, NUNCA faltou, obrigado.

Aos colegas de república Fábio e Rafael que me receberam em São José no início, Bruno e Natan que me receberam no fim e em especial aos meus amigos Carlos Jr. e Diego Jatobá que me ajudaram muito durante a vida joseense.

À tia Fátima, tia Edna e tia Dé que me ajudam mais do que eu mesmo tenho ideia.

Às amigas que fiz pensando em água, Natália, Mariana e Luciana, os períodos que vocês apareciam para mim nunca foram aleatórios e eu, que sempre estava enrolado, me enrolava mais ainda conversando.

À Vozinha que ainda é um norte na minha vida e me presenteou com uma segunda família maravilhosa.

Todos os amigos que a internet me permite manter, Laura, Vicente, Thiago, Chicão, Valdir todos os nadadores do Rio Muriaé, ao grupo TCHURMA que permitiu minha entrada em tão seleta e distinto clube e ao mega-empresário do ramo do petróleo, Gil Rocha.

Ao meu AMADÍSSIMO cachorro Thor, obrigado por me acordar lambendo minha cara.

Agradeço também ao CNPq pela bolsa e ao INPE por todas as oportunidades disponibilizadas para minha formação e ao Projeto Cachoeiras por ter me dado acesso a tantas informações sobre o Rio Paraíba do Sul.

RESUMO

O Rio Paraíba do Sul é um dos principais rios brasileiros, sua bacia hidrográfica é densamente habitada, com uma paisagem complexa que inclui áreas urbanas, industriais, florestas e áreas de agropecuária. Desta bacia origina-se água responsável pelo abastecimento de aproximadamente 20 milhões de habitantes. Análises através de modelos hidrológicos têm o intuito de melhor compreender a dinâmica dos recursos naturais e suas interações. O modelo SWAT (Soil & Assessment Water Tool) foi capaz de reproduzir com alta confiabilidade a vazão e a qualidade da água do rio em período mensal compreendido entre 1992 e 2015. A vazão do rio é fortemente controlada por hidrelétricas, também pela transposição para o Rio Guandú, e em algumas sub-bacias a quantidade disponível de água é controlada pelos solos úmidos. Concomitante a modelagem de vazão, foram realizadas também modelagem de sedimentos, nitrogênio e fósforo. O nitrato modelado apresentou uma boa resposta as épocas de chuva e nas épocas de estiagem o modelo tende a subestimar a concentração de NO₃. No período modelado houve um período de seca histórica entre 2013 e 2015 e o SWAT teve sucesso na simulação, se mostrando uma ferramenta confiável.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. SWAT. Sedimento. Nutrientes.

APPLICATION OF SWAT HYDROLOGICAL MODELING FOR PARAÍBA DO SUL RIVER

ABSTRACT

Paraíba do Sul River is an important Brazilian river, its hydrological watershed is densely inhabited, with a complex landscape that includes urban, industrial, forest and agricultural areas. This watershed supplies approximately 20 million inhabitants. Analyses through hydrological models are intended to better understand the dynamics of natural resources and their interactions. The SWAT (Soil & Assessment Water Tool) model was able to reproduce, with high reliability, the flow and water quality of the river in a monthly period from 1992 to 2015. The river flow is strongly controlled by hydroelectric plants, also by the transposition to the river. Guandú River, and in some sub-basins the available amount of water is controlled by moist soils. Sediment, nitrogen and phosphorus modeling were also performed. The modeled nitrate showed a good response to the rainy season and during the dry season the model tends to underestimate the NO₃ concentration. In the modeled period there was a historical drought period between 2013 and 2015 and SWAT was successful in the simulation, proving to be a reliable tool.

Keywords: SWAT. Hydrological modelling. Sediment. Nutrients.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Bacia do Rio Paraíba do Sul subdividida em 10 sub-bacias.	13
Figura 3.2 – Mapa de uso do solo do Rio Paraíba do Sul.	16
Figura 3.3 – Mapa de solos.	17
Figura 3.4 – Mapa com Estações meteorológicas e exutório de cada sub-bacia.	19
Figura 3.5 - Fluxograma de calibração.	22
Figura 4.1 – Gráfico dos dados observados e simulados considerando todas as sub-bacias. A linha tracejada é a função de identidade e a linha contínua é a relação entre os dados observados e os dados simulados. r^2 é o coeficiente de determinação.	27
Figura 4.2 – Gráfico de duas medidas de incerteza (fator-p e fator-r) para diferentes saídas do modelo no procedimento de calibração e validação. Linhas de referência indicam a faixa desejável de valores para os fatores.	28
Figura 4.3 – Valores de vazão observada e simulada durante o período de 1992 e 2015.	32
Figura 4.4 – Valores de transporte de sedimento (M ton) observado e simulado para o exutório mais a jusante da bacia (exutório 1).	38
Figura 4.5 – Valores de transporte de nitrato (kg) observado e simulado para o exutório mais a jusante da bacia (exutório 1).	38
Figura 4.6 – Relação entre o transporte de nitrato (kg) observado e simulado. Os pontos em preto representam os valores para os meses da estação chuvosa (outubro a março). Os pontos em branco representam os valores para os meses da estação seca (abril a setembro).	39
Figura 4.7 - Valores de transporte de ortofosfato (kg) observado e simulado para o exutório mais a jusante da bacia (exutório 1).	40
Figura 4.8 – Sub-bacia 9 com cenário de ausência dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca.	42
Figura 4.9 – Sub-bacia 4 com cenário de ausência da transposição para o sistema Guandu.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Reclassificação do uso do solo.	15
Tabela 3.2 – Valores para os parâmetros do solo utilizados pelo SWAT.	18
Tabela 3.3 – Avaliação da performance estatística.	20
Tabela 3.4 – Parâmetros de calibração de vazão e valores limites.	23
Tabela 3.5 – Parâmetros de calibração de sedimento e valores limites.	24
Tabela 3.6 – Parâmetros de calibração de nitrato e valores limites.	24
Tabela 3.7 – Parâmetros de calibração de ortofosfato e valores limites.	25
Tabela 4.1 – Resultados das funções objetivas utilizadas para avaliar o desempenho do modelo para cada sub-bacia analisada.	27
Tabela 4.2 – Melhores Valores médios dos parâmetros utilizados na calibração de Vazão.	36
Tabela 4.3 – Melhores Valores médios dos parâmetros utilizados na calibração de sedimentos.	36
Tabela 4.4 – Melhores valores dos parâmetros utilizados na calibração do nitrato.	37
Tabela 4.5 – Melhores valores dos parâmetros utilizados na calibração do fósforo.	37

LISTA DE SÍMBOLOS

PO_4^{3-} Fosfato

$\uparrow+$, $\uparrow-$ Girofrequência para o próton e para o elétron, respectivamente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO	7
2.1.	Objetivo geral	7
2.2.	Objetivos específicos	7
3	METODOLOGIA	8
3.1.	Área de estudo.....	8
3.2.	Soil and Water Assessment Tool (SWAT).....	9
3.3.	Entradas e configuração do modelo.....	11
3.3.1.	Modelo Digital de Elevação	12
3.3.2.	Uso e cobertura do solo.....	13
3.3.3.	Tipos de Solo.....	16
3.3.4.	Dados Meteorológicos	18
3.4.	Calibração, validação e análise de incertezas	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1.	Calibração e validação da vazão e sedimentos	26
4.2.	Vazão, transporte de sedimentos e nutrientes	28
4.3.	Exemplos de uso do modelo na análise de cenários	40
4.3.1.	Reservatório de Paraibuna	41
4.3.2.	Sistema Guandu.....	42
5	CONCLUSÕES.....	44
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

A água na Terra está distribuída em locais diversos, seja pelos oceanos, calotas polares, aquíferos, atmosfera, rios, lagos e reservatórios. Os oceanos correspondem à maior reserva aquática, cerca de 96,54% da água disponível no planeta se encontram espacialmente distribuídas em 71% da superfície terrestre (SHIKLOMANOV, 1998). As águas superficiais continentais - lagos e rios – representam 0,02% do total de água no mundo, ocupando menos de 0,01% da área do globo (LEHNER; DÖLL, 2004).

Com o aumento da população humana, bem como da economia mundial, a demanda por recursos naturais como a água doce tem aumentado rapidamente (PIMENTEL et al., 2004; SHIKLOMANOV; RODDA, 2004; MARENGO; TOMASELLA; NOBRE, 2017). A água é utilizada de várias formas seja irrigação, abastecimento humano e animal, indústria, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer. Cada uso tem sua peculiaridade seja ligado a qualidade ou quantidade de água e todos eles alteram as condições naturais dos recursos hídricos (PIMENTEL et al., 2004; VÖRÖSMARTY et al., 2010; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2018).

Os seres humanos produzem grande parte de seus alimentos através de plantações e animais destinados ao abate. Esta demanda necessita de água, energia e espaço físico. Praticamente todos os tipos de geração de energia dependem de água, seja indiretamente para o resfriamento de termoeletricas ou diretamente como para mover as turbinas de hidroelétricas. Já o espaço físico demandado pelos plantios e animais de abate intensificam as mudanças dos ciclos naturais e estas transformações modificam a qualidade da água nas bacias hidrográficas (MEISSNER et al., 1999; NUGROHO et al., 2013; PERVEZ; HENEGBRY, 2015).

Mudanças de uso e ocupação do solo são uma ligação direta entre atividades antrópicas e processos naturais (VITOUSEK et al., 1997; VERBURG et al., 2004). Práticas como desmatamento, reflorestamento e urbanização interferem no solo e no ciclo da água de uma região. Processos importantes como

evapotranspiração, escoamento superficial, infiltração, umidade do solo e erosão são fenômenos influenciados pelas mudanças de uso e ocupação do solo. Importante ressaltar que embora mudanças no equilíbrio ambiental ocorram naturalmente, as ações antrópicas aceleram estes processos (TUNDISI; TUNDISI, 2012). Grande parte das alterações no padrão de uso e cobertura do solo geram o aumento do escoamento superficial da água e conseqüentemente elevam as quantidades de sedimentos e nutrientes (nitrogênio e fósforo) exportados do ambiente terrestre para o ambiente aquático (FILOSO et al., 2003; SEITZINGER et al., 2005).

O aumento de sedimentos nos rios causados pela erosão, prejudica a vida aquática, torna o tratamento da água custoso, diminui a vida útil de reservatórios e inibe o uso recreativo da água. (KONDOLF, 1997; MADSEN et al., 2001; GRANT; SCHMIDT; LEWIS, 2003; KONDOLF; RUBIN; MINEAR, 2014). O transporte de sedimentos e materiais particulados nos rios para os oceanos também representam uma importante via para o ciclo geoquímico global pois é uma medida importante para entender o fenômeno da denudação continental e da eficácia dos processos erosivos no rebaixamento do relevo (WALLING; FANG, 2003).

Medidas como monitoramento de rios e represas são tomadas com intuito de compreender a dinâmica local das águas para prevenir eventuais danos ao abastecimento humano, bem como afetar à fauna e flora local dependentes da disponibilidade e qualidade destas águas. Ferramentas como modelos hidrológicos podem auxiliar na produção de conhecimento acerca dos recursos naturais (JAKEMAN; LETCHER, 2003; XIMING, 2003; FLETCHER; ANDRIEU; HAMEL, 2013; TONKIN et al., 2019).

Entende-se por modelagem hidrológica a aplicação de um modelo matemático para representação do comportamento de um sistema, de maneira a produzir uma resposta dado um estímulo ou entrada. Aplicando esse conceito a um modelo matemático hidrológico, tem-se a representação de um sistema – neste caso, uma bacia hidrográfica – e por meio de parâmetros, simula-se o

escoamento superficial da bacia hidrográfica (RENNÓ, 2003; VIOLA, 2008; PEREIRA, 2013; JAYAWARDENA, 2014).

Os modelos hidrológicos são classificados com base em 5 diferentes aspectos: 1) Tipos de variáveis utilizadas; 2) Tipos de relações entre as variáveis; 3) Forma de representação dos dados; 4) Relações espaciais e; 5) Relações temporais.

Os modelos podem ser empíricos ou baseados em processos. Modelos empíricos utilizam relações baseadas em observações, as quais são frequentemente realizadas por funções estatísticas que não levam em conta os processos físicos envolvidos (RENNÓ; SOARES, 2000). Em geral, estes modelos são bastante simples e úteis no dia a dia, mas são pouco robustos, pois são específicos para a região e condições para as quais as relações estudadas foram estimadas. Os modelos baseados em processos podem ser subdivididos em modelos físicos e semi-conceituais. Nos modelos físicos são empregadas equações na representação dos processos, utilizando parâmetros determinados com base física (TUCCI, 2005; VIOLA, 2008), isto é, os parâmetros podem ser estimados através de medidas reais. Nos modelos semi-conceituais, por sua vez, embora sejam aplicadas formulações que visem à descrição física dos processos, são empregados parâmetros calibráveis que, de certa forma, mantêm o empirismo presente (TUCCI, 2005; VIOLA, 2008).

Os modelos recebem a classificação de contínuos quando os fenômenos são representados continuamente ao longo do tempo, ou discretos, quando as variáveis são obtidas em intervalos de tempo pré-definidos. Variáveis de entrada frequentes em modelos de bacia hidrográfica, como a precipitação e a evapotranspiração, geralmente são registradas discretamente, em intervalos de tempo pré-definidos, de maneira que sua variação ao longo do intervalo não é conhecida, o que implica na aceitação de uma discretização temporal relacionada à precisão desejada e à disponibilidade de dados (VIOLA, 2008). Por exemplo, dados de precipitação total diária, aplicados a um modelo com passo da mesma ordem, resultam na aceitação da intensidade média no intervalo como a real (PEREIRA, 2013). De maneira geral diz-se que os

sistemas hidrológicos são contínuos, mas são representados por modelos discretos.

Quanto à forma de representação dos dados no espaço, os modelos podem ser classificados como concentrados ou distribuídos. Em modelos concentrados considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada, o que limita a representação da variabilidade espacial das características da bacia, dada sua natural heterogeneidade (JAYAWARDENA, 2014). Os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo, podendo a bacia hidrográfica ser subdividida em sub-bacias (modelo semi-distribuído) ou em células (modelo distribuído), proporcionando melhor descrição da variabilidade espacial dos processos e das variáveis de entrada (JAYAWARDENA, 2014).

O SWAT é um modelo semi-conceitual, contínuo e semi-distribuído, uma ferramenta eficaz para estimar a hidrologia, carga de sedimentos e nutrientes. Um exemplo do uso de pesquisas utilizando o SWAT é encontrado para o Rio Mississippi – EUA, para avaliar a zona hipóxica no Golfo do México, com vários efeitos negativos na ecologia local foi utilizada a modelagem para compreender os impactos deste problema ambiental. A Conservation Effects Assessment Project (CEAP) fez uma avaliação das fontes de nutrientes que são enviadas ao Golfo do México (WHITE et al., 2014), este estudo concluiu que áreas de cultivos agrícolas foram majoritariamente importantes na exportação de nutrientes para o Golfo, porém em áreas de altas densidades populacionais, a taxa de fósforo se mostrou mais significativa se comparado a agricultura em ambientes não-urbanos (MORIASI et al., 2013), e o SWAT foi capaz de modelar com sucesso este sistema.

Na China, o SWAT é utilizado em diversos projetos ligados ao National Basic Research Program of China (973 Program), programa de incentivo à pesquisa básica chinesa. Dentre os projetos do programa se encontram os estudos da bacia hidrográfica do reservatório das Três Gargantas, esta barragem é o maior projeto de geração de energia hidroelétrica do mundo. Situada em Sandoupin,

na cidade de Yichang, a construção da barragem se iniciou em 1994 e a primeira vez que a mesma se encontrou cheia e operante foi em 2003. Sua bacia de 59.900 km² e de população de 16 milhões de pessoas (SHEN et al., 2008) se caracteriza por ser 96% de montanhas, aproximadamente metade desta área é coberta por floresta (WANG et al., 2014). Os fertilizantes provenientes das áreas de agricultura causaram uma grande eutrofização da área (ZHANG et al., 2012) influenciada pelas mudanças de uso da terra (LIU et al., 2013; SHEN et al., 2013). Como os diferentes tipos de usos do solo têm respostas adversas na exportação de nutrientes e, no caso desta bacia, tipos de solo com características muito distintas como solo seco e arrozais alagados influenciam diferentemente nas características da água, o modelo mesmo assim foi bem sucedido nesta representação dos processos hidrológicos.

Em uma revisão sobre a aplicação de SWAT nos recursos hídricos brasileiros (BRESSIANI et al., 2015) foi observado um aumento na frequência do uso de SWAT em pesquisas. Cerca de 67% das publicações são sobre rios do sudeste brasileiro e quando analisados os objetivos, 48% destes estudos objetivam a questão hidrológica e 37% em sedimentos. Poucos trabalhos (9%) avaliam o transporte de nutrientes. Dentre as pesquisas que analisaram vazão, sedimentos e nutrientes, destaca-se o trabalho de Rocha et al. (2012) que utilizou o SWAT para embasar decisões de políticas de gerenciamento (Better Management Policies, BMP) de um pequeno rio próximo a Brasília-DF. Neste trabalho foi calculada a influência do uso e ocupação do solo sobre a qualidade da água e então o modelo pôde ser aplicado para simular políticas conservacionistas de modo que as mudanças de uso do solo e os efluentes urbanos tenham menor impacto sobre a qualidade das águas.

No presente estudo, foi abordado a modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, uma das bacias mais importantes do Brasil situada em uma das áreas mais densamente habitadas do (IBGE, 2011) utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Como resultados, foram demonstrados o desempenho do SWAT na modelagem de vazão, sedimentos e nutrientes na bacia do rio Paraíba do Sul. Além disso, foram analisados as diferenças entre dados modelados e observados

mensalmente no período entre os anos de 1992 a 2015 e foram verificados a eficácia do modelo para diferentes áreas, considerando influência do reservatório, transposição do rio e uso e cobertura da terra em uma região de paisagem complexa.

2 OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar o comportamento hidrológico da bacia do Paraíba do Sul a partir da utilização do modelo SWAT afim de apoiar futuras análises de avaliação das melhores práticas de gestão de água e fornecer segurança hídrica durante possíveis eventos climáticos extremos, grande preocupação para esta bacia com histórico recente de seca recorde.

2.2. Objetivos específicos

- a) Analisar a série histórica dos dados observados de precipitação e vazão das diferentes sub-bacias consideradas para análise.
- b) Avaliar o desempenho do modelo SWAT na representação do comportamento hidrológico da bacia do rio Paraíba do Sul.
- c) Identificar os principais parâmetros utilizados pelo SWAT que influenciam nas variáveis em estudo (análise de sensibilidade e incerteza).
- d) Calibrar e validar o SWAT para representar a vazão ao longo da bacia, o transporte de sedimentos e nutrientes para a foz.
- e) Aplicar o modelo na análise de cenários afim de avaliar os impactos de grandes obras na vazão do rio Paraíba do Sul.

3 METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

Localizado na região Sudeste do país, o rio Paraíba do Sul tem sua nascente no município de Areias, região norte do estado de São Paulo, seu nome é trocado para Paraíba do Sul após a confluência com o rio Paraibuna, que nasce também na Serra da Bocaina, no município paulista de Cunha. A confluência dos dois rios formadores se dá nas proximidades do município de Paraibuna, ainda no estado de São Paulo. Sua foz está localizada ao norte do estado do Rio de Janeiro, na praia de Atafona, no município de São João da Barra após o trajeto de aproximadamente 1.150 quilômetros.

Abrangendo uma área de 57.000 km², sua bacia é dividida entre os estados de São Paulo (23,7%), Minas Gerais (39,6%) e Rio de Janeiro (36,7%) onde deságua. O rio corre no sentido oeste - leste numa altitude média de 370 metros, seus afluentes principais são o Rio Muriaé, o Rio Pomba, o Rio Paraibuna e o Rio Piabanha. A Bacia do Rio Paraíba do Sul abrange 184 municípios, sendo 39 localizados no Estado de São Paulo, 57 no Estado do Rio de Janeiro e 88 em Minas Gerais. Sua área estende-se por uma das regiões mais populosas e industrializadas do Brasil. A bacia abrigava, no ano de 2000, 4.920.915 habitantes (IBGE, Censo 2000) e em 2005, 5.254.360 habitantes (IBGE, população estimada). No ano de 2010, a população da região chegou a 5.559.356 de habitantes (IBGE, Censo 2010) e projeções indicam que em 2020 serão 6.066.843 de habitantes (MMA/CEIVAP, 2015).

Na área da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, situam-se indústrias diversas como usinas de álcool e açúcar e de bebidas, indústrias metalúrgicas, químicas, têxteis, alimentícias e papeleiras. A agropecuária é caracterizada pela pecuária de baixa produtividade e culturas agrícolas de pequeno porte, com exceção ao plantio de arroz na porção paulista do vale, à cana-de-açúcar em Campos – RJ e do café, ao norte da bacia no estado de Minas Gerais (TOTTI, 2008).

A transposição do rio Paraíba do Sul para o sistema Guandu é o maior consumidor de recursos hídricos da bacia, em média 160m³/s mensais de água são retirados para outra bacia hidrográfica. O setor industrial, muito presente na região, é responsável por 20m³/s de média do consumo mensal, enquanto o setor agropecuário consome 42m³/s, 60% deste consumo se encontra na porção mineira da bacia (MMA/CEIVAP, 2015).

3.2. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos EUA (United States Department of Agriculture) para simular o efeito de práticas de manejo da terra sobre recursos hídricos em grandes bacias hidrográficas, com solos, uso da terra e condições de manejo variados, durante longos períodos de tempo (NEITSCH et al., 2009). A simulação com SWAT requer entradas de dados de clima, solos, topografia, vegetação e uso da terra para modelar fluxo de água e movimento de sedimentos, ciclagem de nutrientes e demais processos nas bacias hidrográficas que dizem respeito a quantidade e qualidade da água. O SWAT é um modelo adequado para a simulação contínua e de longo prazo.

A simulação implementada neste estudo, emprega o método de número de escoamento segundo o Soil Conservation Service (USDA SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972) para estimar o escoamento superficial e, em seguida, completa o balanço hídrico por meio de simulação de fluxos de sub-superfície, evapotranspiração, armazenamentos de solo, e perdas de infiltração profunda. O método número de escoamento requer um passo de tempo mensal. O potencial de evapotranspiração é calculado internamente pelo SWAT com base em entradas de dados meteorológicos.

O método do número de escoamento estima o escoamento superficial mensal (Q) a partir da precipitação acumulada (P), perdas iniciais (I_a), um parâmetro de armazenamento máximo do solo (S, profundidade), e um número de escoamento (CN). A seguinte fórmula representa o método do número de escoamento

(USDA SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972).

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$$

Ia é tipicamente assumido como 20% do S (valor padrão do SWAT). Sendo assim, a equação pode ser reescrita como:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

O valor de S está relacionado com o número de escoamento CN, onde:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

O CN é estimado em função do uso da terra, cobertura, condição hidrológica do solo e antecedente de umidade do solo. O modelo fornece recursos para ajustar automaticamente o CN baseada na umidade do solo, evapotranspiração da planta e inclinação do terreno. Porém, a simplicidade conceitual do método do número de escoamento também apresenta alguns problemas potenciais. Especificamente, o número de escoamento foi desenvolvido como uma metodologia de projeto para estimar o volume médio de escoamento de um determinado período de retorno, dada a média total de chuva do mesmo período de retorno. O modelo não foi projetado para prever o escoamento de eventos individuais específicos ou escoamento de eventos menores e mais frequentes, e a aplicabilidade para simulação contínua é inexata em escalas espaciais pequenas. A produção de sedimentos e a erosão são calculados pelo SWAT usando o Equação Universal de Perda do Solo Modificada (WILLIAMS, (1975). A MUSLE é baseada em vários fatores, incluindo volume de escoamento superficial, taxa de escoamento de pico, área de unidade de resposta hidrológica (URH), erodibilidade do solo, uso e cobertura do solo, práticas de apoio, topografia, e um fator de fragmento. A MUSLE implicitamente combina os processos de separação e entrega de sedimentos. A carga de nutrientes e o transporte são simulados utilizando o escoamento superficial e o fluxo de subsuperfície. Um recurso importante do SWAT é a incorporação de um modelo de crescimento da planta, incluindo interações das

plantas com os estoques de água e nutrientes. A transformação das várias espécies de nitrogênio e de fósforo é simulada em detalhe no solo, no entanto, as concentrações de nutrientes nas descargas de águas subterrâneas são especificadas pelo usuário. SWAT é considerada uma ferramenta eficaz para a simulação de bacias hidrográficas, especialmente para a estimativa de vazões e cargas de poluentes acumulados em bacias hidrográficas agrícolas e rurais (GASSMAN et al., 2007).

Os dados de entrada foram inseridos e organizados com software ArcMAP 10.3 e a extensão livre “ArcSWAT” na versão 10.2 (disponível em <https://swat.tamu.edu/software/arcswat/>). O ArcSWAT necessita de quatro dados básicos de entrada: Modelo Digital de Elevação, mapa de tipos de solo, mapa de uso do solo e dados meteorológicos. Para a bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, os dados iniciais estão disponíveis gratuitamente e acessíveis via diversas fontes. Após a configuração dos dados de entrada, utilizou-se o programa SWAT-CUP versão 5.1.8 (disponível em <https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>) para calibração, validação e análises de sensibilidade.

3.3. Entradas e configuração do modelo

A bacia foi subdividida em 10 sub-bacias (Figura 3.1), baseado nos resultados de PACHECO et al. (2017) e na disponibilidade dos dados meteorológicos das estações de monitoramento fluviométrico da ANA. De acordo com PACHECO et al. (2017) as características físico-químicas do Rio Paraíba do Sul podem ser agrupadas em 4 regiões distintas, localizadas desde a nascente do Rio até sua foz, as sub-bacias 10 e 9 são dois agrupamentos diferentes (agrupamento C1 e C2), as bacias 8 e 7 são um agrupamento (C3) e as bacias 4 e 1 são o último agrupamento (C6). As sub-bacias 2 (Rio Muriaé), 3 (Rio Pomba), 5 (Rio Piabanha) e 6 (Rio Paraibuna) foram definidas pela importância dos rios contidos nessas áreas que desaguam no Paraíba do Sul.

O período de simulação se inicia em janeiro de 1992 e termina em dezembro de 2015, sendo mensal e com 288 meses de observação. Foram usados o

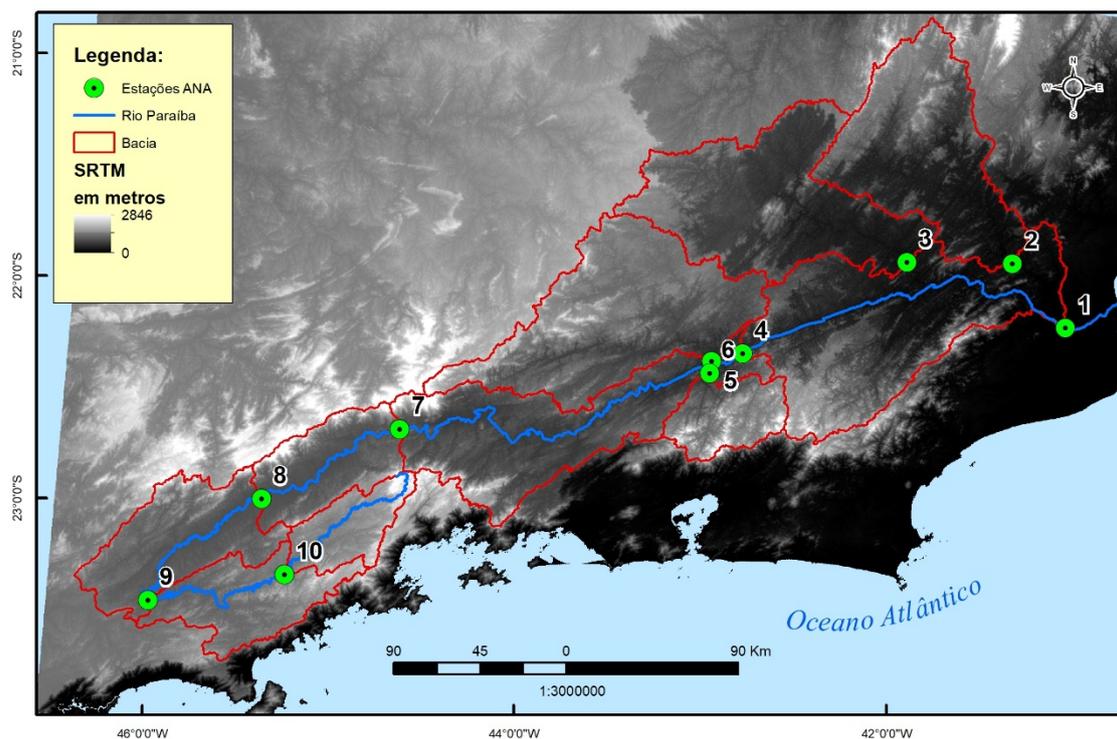
período de 1992 a 2008 para calibração do modelo e os anos restantes para a validação, sendo o ano de 1992 utilizado como “aquecimento” para que o modelo excluísse eventuais problemas de condição inicial.

Baseado nos dados de entrada, o SWAT define as Hidrologic Response Unit (HRUs) onde cada interseção de diferentes usos, ocupações e tipos de solo formam uma Unidade hidrológica, com características semelhantes entre si. Neste modelo foi adotado o critério onde cada HRU deveria ser no mínimo 10% da área de cada sub-bacia, assim sendo, o modelo identificou 54 HRUs diferentes dentro da bacia.

3.3.1. Modelo Digital de Elevação

O MDE foi obtido através da missão Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), cujos dados são disponibilizados pelo United States Geological Survey (USGS). Os dados SRTM para todo o território nacional foram refinados da resolução espacial original de 3 arcossegundos (90 m) para 1 arco-segundo (30 m), pela interpolação da variabilidade espacial dos dados que se condicionam em função da relação dos pesos das amostras às suas distâncias, sendo este método definido como krigagem (VALERIANO, 2002). A carta altimétrica por sua vez deve ser configurada para os sistemas de projeção usados pelo SWAT, configurando assim o MDE para a projeção SIRGAS 2000 UTM zona 22 Sul. Com os dados altimétricos foi possível gerar as 10 sub-bacias (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Bacia do Rio Paraíba do Sul subdividida em 10 sub-bacias.



As sub-bacias não pertencentes ao rio principal (rio Muriaé, rio Pomba, rio Paraibuna e rio Piabanha) foram definidas pela contribuição da vazão no rio principal e pela presença de uma estação de monitoramento da ANA que contemplasse um período longo de observações de vazão.

3.3.2. Uso e cobertura do solo

O banco de dados SIGA-CEIVAP (“SIGA WEB”, Acessado em setembro de 2018) disponibiliza o mapa de uso e cobertura da terra. A confecção desta base de dados usou a classificação de máxima verossimilhança em imagens do Landsat 5 de 2011, na escala de 1:250.000, na projeção SIRGAS 2000. Este mapa foi confeccionado com dados de apoio da Base Vetorial Contínua de escala 1:250 mil IBGE-BC250, 2011 e do Mapa de Uso do Solo e Cobertura Vegetal da EPE/SONDOTÉCNICA, 2007. No processo foram utilizadas dezenas do satélite orbital Landsat 5, sensor TM, bandas 3, 4 e 5, em formato digital Geo Tiff.

Na seleção destas imagens foi considerada a qualidade da imagem, o baixo nível de cobertura por nuvens e o período de visita do satélite, cujas datas foram pesquisadas as mais próximas possíveis entre si, visando uma representação homogênea do mosaico de cenas para a região. O georreferenciamento destas cenas orbitais foi realizado através do uso de imagens ortoretificadas do mesmo satélite, porém de período pretérito (2001/2002), as quais foram obtidas junto a Global Land Cover Facility. Após a coleta de dados, aplicou-se o método de classificação pixel a pixel MAXVER. Considerou-se a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos. No processo de classificação foram obtidas amostras do Mapa Uso do Solo e Cobertura Vegetal (elaborado a partir de imagens Landsat de 2005-2006, escala de mapeamento 1:100.000) executado para a AAI - Avaliação Ambiental Integrada dos Aproveitamentos Hidrelétricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul (maio/2007) pela empresa Sondotécnica S.A. para a EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Na complementação e atualização do uso atual do solo e da cobertura vegetal, foi utilizado o Levantamento da Cobertura Vegetal Nativa do Bioma Mata Atlântica do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - PROBIO de 31/01/2007.

O resultado deste levantamento é um mapa de uso e cobertura do solo com 11 classes distintas que foram agrupadas em 5 classes (Figura 3.2). Este agrupamento foi feito respeitando a afinidade entre as classes (Tabela 3.1) e posteriormente, identificando-as no software ArcSWAT que contém um banco de dados com informações pré-definidas para as classes de pastagem, área de água, área agrícola, área urbana e florestas (Tabela 3.1).

Os fragmentos florestais e pastagem constituem 85% da área da bacia (41 e 44% respectivamente) com as florestas predominantes nas áreas altas principalmente na porção paulista, na município de Resende e Serra da Mantiqueira (sub-bacias 7, 8, 9 e 10) e na região de Teresópolis, Serra das Araras (limite sul da sub-bacia 5). Nas pastagens estão a produção pecuária e se situam nas regiões mais baixas da bacia (sub-bacias 3 e 1). A área agrícola corresponde a 8,5% da área total e as três regiões com maior densidade de

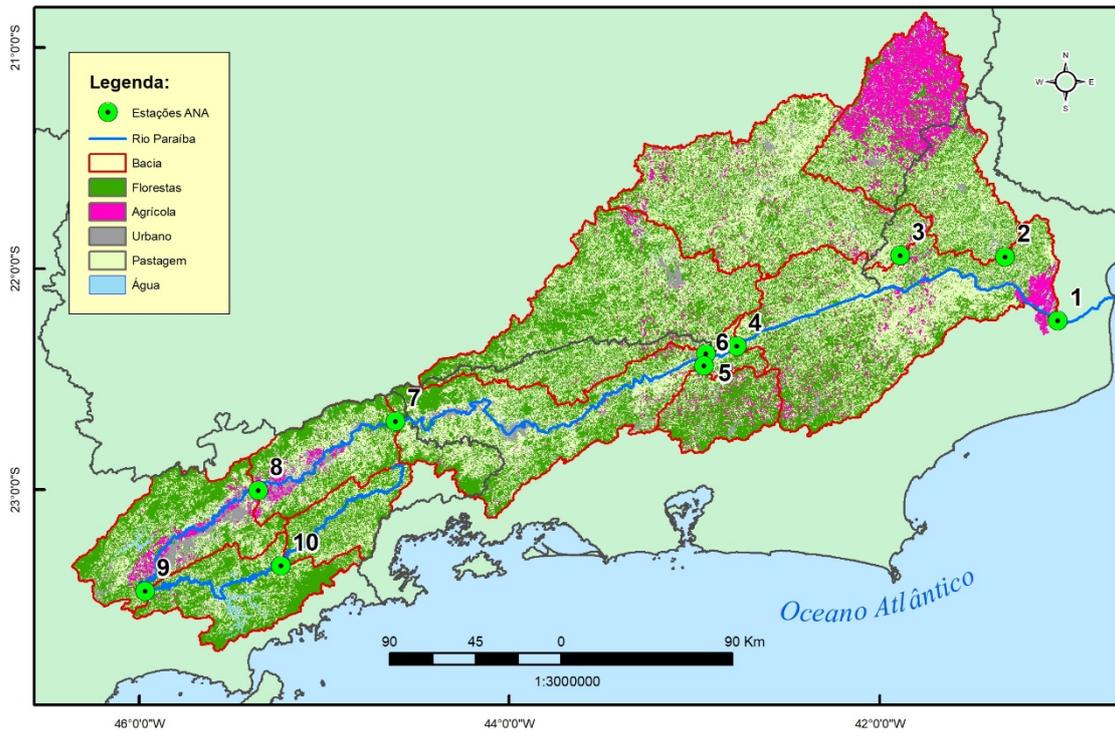
área agrícola são: o norte da bacia, com intensa produção cafeeira nos municípios de Rosário da Limeira e Fervedouro; a leste, próximo ao ponto 1, uma área intensa de produção de cana-de-açúcar; e na porção paulista da bacia, próximas ao Rio Paraíba do Sul, onde produz-se arroz (<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=12685>). As áreas urbanas correspondem a 5% do uso do solo, concentrando nas maiores cidades da bacia, São José dos Campos – SP, Taubaté – SP, Juiz de Fora – MG e Volta Redonda -SP. Os 1,5% restante são ocupados por lâminas d'água como os reservatórios de Paraibuna, Santa Branca e Funil e o próprio Rio Paraíba do Sul.

Tabela 3.1 - Reclassificação do uso do solo.

COHIDRO	Agrupamento	ArcSWAT
Campos/Pastagens Vegetação esparsa	Pastagem	PAST
Corpo hídrico	Água	WATR
Floresta Estacional (vegetação densa) Floresta Estacional (vegetação esparsa) Floresta Ombrófila (vegetação densa) Floresta Ombrófila (vegetação esparsa) Florestamento/Reflorestamento Vegetação densa	Floresta	FRSE
Área Agrícola	Agrícola	AGRL
Área urbanizada	Urbano	URBN

Fonte: Cohidro (2012).

Figura 3.2 – Mapa de uso do solo do Rio Paraíba do Sul.

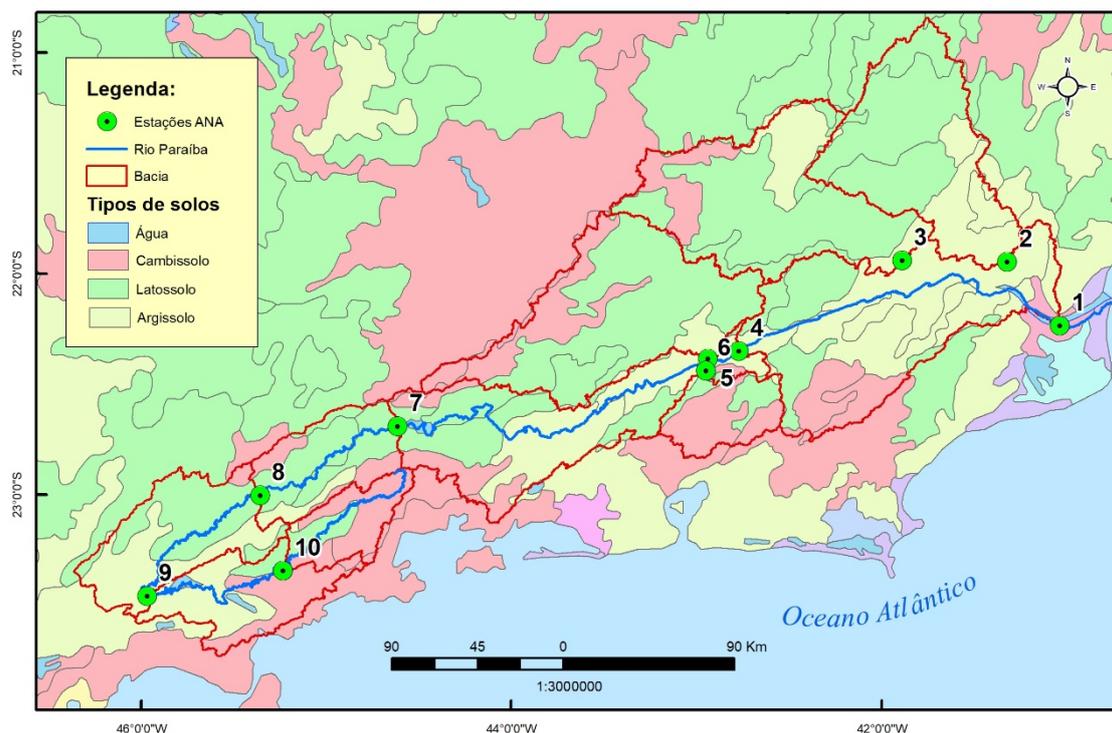


Fonte: Santos et al. (2011).

3.3.3. Tipos de solo

O mapa de referência para os solos utilizado foi o “O Novo Mapa de Solos do Brasil Legenda Atualizada”, elaborado pela Embrapa Solos. Todos os sub-tipos de solos identificados foram agrupados nos três principais solos encontrados na bacia: Latossolo, Cambissolo e Argissolo (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Mapa de solos.



Fonte: Santos et al. (2011).

O banco de dados do ArcSWAT precisa ser alimentado com as informações referentes aos solos brasileiros, diferente dos dados de uso do solo, os dados de pedologia não têm classes relativas semelhantes aos disponíveis no modelo.

As informações sobre os solos é oriunda do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>), um sistema desenvolvido e mantido pela EMBRAPA – SOLOS em parceria com a EMBRAPA Informática Agropecuária. O SISOLOS contém os dados necessários (Tabela 3.2), tais como granulometria ou disponibilidade de carbono, de levantamentos pedológicos necessárias ao modelo.

Tabela 3.2 – Valores para os parâmetros do solo utilizados pelo SWAT.

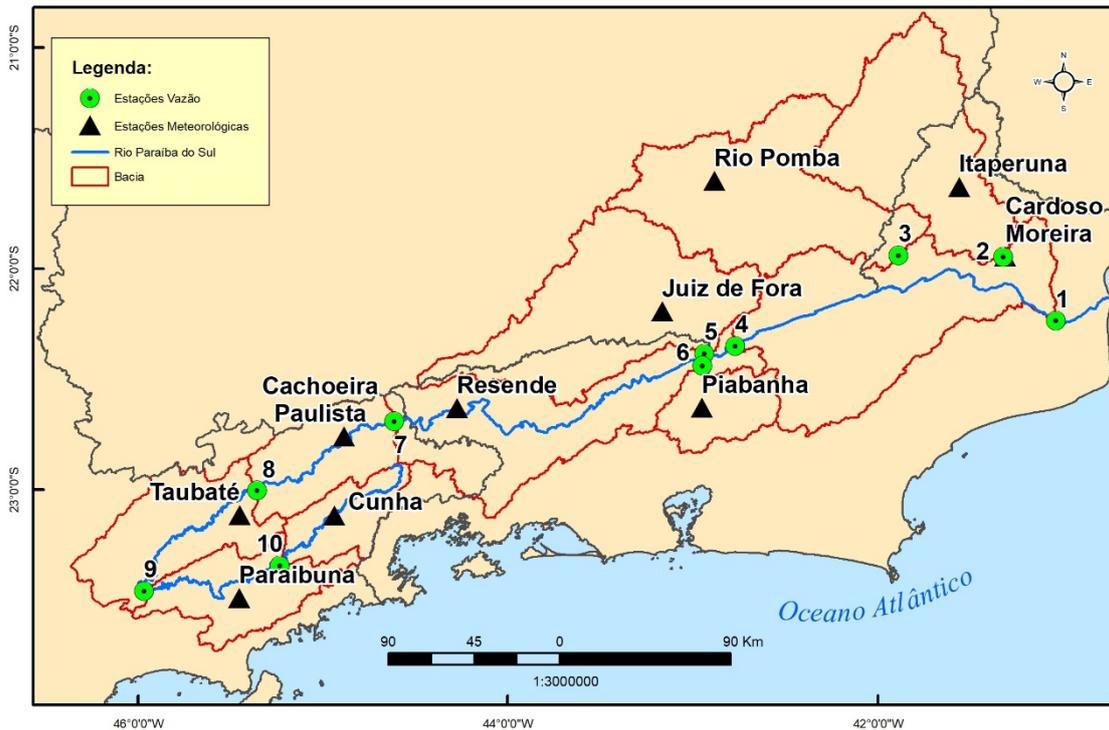
Variável do SWAT	Definição	Argissolo			Latossolo		Cambissolo		
		1	2	3	1	2	1	2	3
VIAM	Camadas	1	2	3	1	2	1	2	3
NLAYERS	Número de camadas	3			2		3		
HYDGRP	Grupo Hidrológico dos solos (NRCS)	A			B		A		
SOL_ZMX	Profundidade máxima para enraizamento no solo (mm)	430			150		100		
SOL_CRK	Potencial ou de volume máximo fissura do perfil do solo expressa como uma fração do volume total do solo	0.5			0.5		0.5		
SOL_Z1	Profundidade da superfície do solo até ao fim da camada (mm)	70	290	430	120	150	30	60	100
SOL BD1	Densidade aparente úmida (Mg/m ³ ou g/cm ³)	1.18	1.4	1.52	0.47	1.37	0.19	1.48	1.53
SOL_AWC1	Capacidade de água disponível na camada de solo (mm H ₂ O/mm solo)	0.15	0.09	0.1	0.21	0.11	0.25	0.1	0.12
SOL K1	Condutividade hidráulica saturada (mm/hr)	13.15	0.01	25.4	86.97	0.23	117.3	8.37	18.96
SOL CBN1	Teor de carbono orgânico (% peso do solo)	15.8	4.2	1.2	20.3	3.3	24.3	3.1	1,4
CLAY1	Conteúdo de argila, partículas de solo <0.002mm (% peso do solo)	34.6	62.5	9.6	10	55	18	28	17
SILT1	Conteúdo de silte, particular de solo entre 0,05 e 0.002mm (% peso do solo)	10	4.7	15.9	23	12	8	17	35
SAND1	Conteúdo de areia, partículas de solo entre 2.0 e 0.05mm (% peso do solo)	55.4	32.8	74.5	67	33	74	55	48
ROCK1	Conteúdo de fragmentos de rocha (% do peso total)	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL ALB1	Albedo do solo úmido	0.01	0.05	0.27	0	0.06	0	0.07	0.23
USLE K1	Equação de erodibilidade do solo USLE (0.013 tonelada m ² hr) / (m ³ tonelada métrica cm)	0.09	0.1	0.11	0.11	0.09	0.1	0.1	0.15

Fonte: Santos et al. (2011).

3.3.4. Dados meteorológicos

Precipitação, temperatura máxima e mínima e umidade relativa foram em 10 estações meteorológicas da ANA (Agência Nacional das Águas) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As estações selecionadas foram: Cardoso Moreira, Piabanha, Paraibuna, Juiz de Fora, Itaperuna, Resende, Taubaté, Rio Pomba, Cunha e Cachoeira Paulista (Figura 3.4). Os dados coletados nestas estações são mensais variando entre janeiro de 1992 a dezembro de 2015.

Figura 3.4 – Mapa com Estações meteorológicas e exutório de cada sub-bacia.



Além dos valores de precipitação, temperatura máxima e mínima e umidade relativa, o modelo requer valores de radiação solar e velocidade do vento, estes dados foram obtidos pelo “gerador de condições atmosféricas” (WXGEN), disponível no banco de dados do arcSWAT. Os valores gerados desta forma são oriundos de dados médios mensais ao longo de vários anos (NEITSCH et al., 2009). O modelo de gerador de condições atmosféricas (WALLIS; GRIFFITHS, 1995) também pode ser usado para gerar para preencher lacunas em dados meteorológicos. Os dados de temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar e umidade relativa são então gerados com base na presença ou ausência de chuva para o dia e a velocidade do vento é gerada de forma independente. Para este trabalho, somente os dados de radiação solar e velocidade do vento foram gerados automaticamente pelo WXGEN.

3.4. Calibração, validação e análise de incertezas

A calibração de um modelo hidrológico consiste em modificar os parâmetros dentro de uma faixa aceitável para obter um modelo que replique as condições previamente conhecidas dos processos modelados (VIESSMAN; LEWIS, 2003). O algoritmo SUFI-2 do pacote de software SWAT-CUP foi usado para calibração de modelo, validação, sensibilidade e análise de incerteza. O SUFI-2 endereça as incertezas dos parâmetros e captura a maioria dos dados medidos dentro das incertezas de previsão de 95% (95PPU) do modelo. A 95PPU é calculada nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de uma variável de saída obtida por amostragem de hipercubo latino. Para o bom ajuste, como estamos comparando duas bandas (o 95PPU para simulação de modelo e a banda representando dados medidos mais seu erro), dois índices referidos como fator-p e fator-r foram considerados (JOHNSON; ABBASPOUR; VAN GENUCHTEN, 2004). Para descarga o fator-p recomendado é o $>0,7$ (ABBASPOUR et al., 2015). Para o fator-r, a referência é $<1,5$ (ABBASPOUR; SRINIVASAN; YANG, 2008). A análise de sensibilidade global foi usada para determinar as sensibilidades dos parâmetros. Três funções objetivas foram usadas para julgar a eficácia da calibração e validação: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE); Percentual de polarização (PBIAS) e raiz do erro médio quadrático (RMSE). Os valores de referência das funções objetivas para a calibração hidrológica, de sedimentos e de nutrientes considerados neste trabalho foram propostos por Moriasi et al. (2007) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Avaliação da performance estatística.

Performance Classificação	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Vazão	Sedimento	N, P
Muito bom	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$\text{PBIAS} < \pm 15$	$\text{PBIAS} < \pm 25$
Bom	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 30$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS} < \pm 40$
Satisfatório	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$\pm 30 \leq \text{PBIAS} < \pm 55$	$\pm 40 \leq \text{PBIAS} < \pm 70$
Não satisfatório	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	$\text{PBIAS} \geq \pm 55$	$\text{PBIAS} \geq \pm 70$

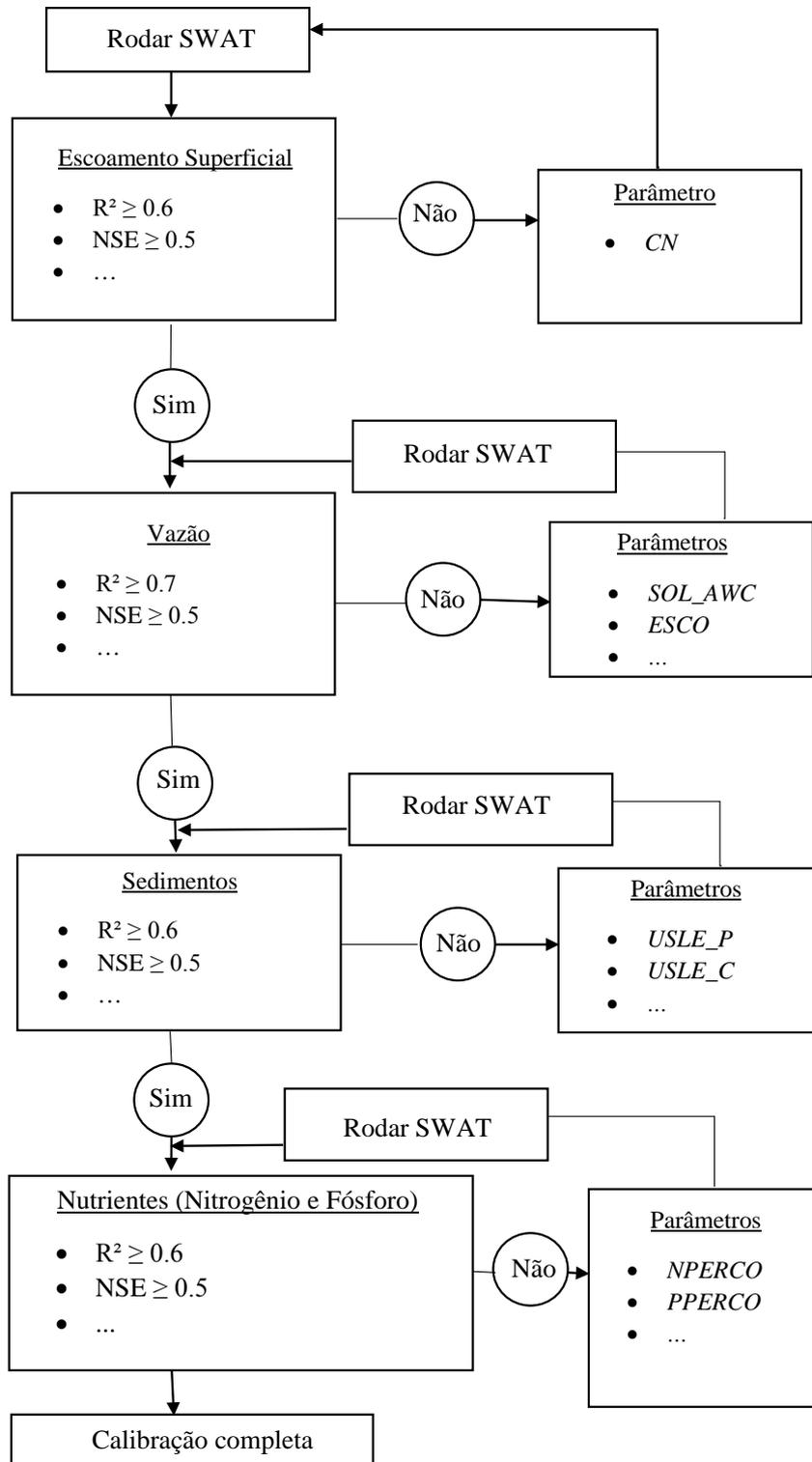
Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007).

O processo de calibração e validação segue uma ordem de processamento (Figura 3.5). Para atingir a calibração dos nutrientes, primeiro calibra-se os dados de vazão com parâmetros selecionados (Tabela 3.4). Quando os parâmetros selecionados atingem valores que atendam as funções objetivas, calibram-se os sedimentos com os parâmetros selecionados (Tabela 3.5). Assim que eles são atendidos, calibra-se os nutrientes (Tabela 3.6 e Tabela 3.7).

O SWAT-CUP testa valores aleatórios para cada parâmetro dentro de limite pré-estabelecidos e baseados na literatura, a cada rodada de testes, o modelo compara o resultado simulado com o resultado medido em campo. Após um número pré-definido de rodadas, a sensibilidade do modelo aos parâmetros utilizados também é observada, desta forma é conhecido quais variáveis tem maior influência sobre o resultado modelado. Ao fim, escolhe-se os valores dos parâmetros com a rodada que apresentou os melhores resultados de funções objetivas.

Os dados dos 288 meses de observação da vazão estão disponíveis no site da ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) para as 10 sub-bacias. Os dados de sedimentos, nitrogênio e fósforo foram cedidos pelo professor Dr. Carlos Eduardo Rezende do Laboratório de Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Norte Fluminense (GODOY et al., 2013; WANDERLEY et al., 2014).

Figura 3.5 - Fluxograma de calibração.



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

Tabela 3.4 – Parâmetros de calibração de vazão e valores limites.

Parâmetro	Definição	Limites	
		MIN	MAX
CN2.mgt (forest)	Curva números do escoamento superficial inicial do SCS para a condição de umidade de cada tipo de uso do solo. Baseado em (TUCCI, 2001).	30	40
CN2.mgt (agriculture)		62	90
CN2.mgt (urban)		73	90
CN2.mgt (pasture)		40	90
RCHRG_DP.gw	Fração de percolação do aquífero profundo	0	1
ALPHA_BF.gw	Fator Alpha para a curva de recessão do aquífero profundo (1/dia)	0	1
GWQMN.gw	Limite da profundidade de água no aquífero raso necessário para que o retorno da vazão aconteça (mm H ₂ O)	0	5000
GW_REVAP.gw	Coefficiente “REVAP”	0.02	0.2
GW_DELAY.gw	Tempo de atraso para água subterrânea (dias)	0	120
REVAPMN.gw	Limite profundidade de água em aquífero raso para a percolação de “REVAP” acontecer para o aquífero profundo (mm H ₂ O)	0	500
ESCO.hru	Fator de compensação de evaporação do solo	0	1
CH_K2.rte	Valor-n de Manning para o canal principal	0	500
CANMX.hru	Máximo de área de cobertura foliar (mm H ₂ O)	0	100
CH_S2.rte	Média de declividade do canal principal	-0.001	10
SLSUBBSN	Média de declividade da sub-bacia	10	150
GW_SPYLD	Produtividade específica do aquífero raso (m ³ /m ³)	0	0.4
CH_COV1	Fator de erodibilidade do canal	-0.05	0.6

Fonte: Arnold et al. (2012).

Tabela 3.5 – Parâmetros de calibração de sedimento e valores limites.

Parâmetro	Definição	Limites	
		MIN	MAX
CH_COV2.rte	Fator de cobertura do canal	-0.001	1
USLE_P.mgt	USLE para práticas no uso do solo	0	1
USLE_C{1}.plant.dat	Valor mínimo do fator de USLE C para erosão de	0.001	0.5
USLE_C{12}.plant.dat	água aplicado a cobertura do solo	0.001	0.5
SPCON.bsn	Parâmetro linear para calcular a quantidade máxima de sedimento que pode ser reinserido durante a modelagem do canal	0	1
SPEXP.bsn	Parâmetro expoente para calcular a quantidade de sedimento que pode ser reinserido durante a modelagem do canal	1	1.5
CH_BNK_KD.rte	Erodibilidade do sedimento no banco do canal por teste de jateamento ($cm^3/N-s$)	1.1	1.9
CH_BED_KD.rte	Erodibilidade do sedimento do leito do canal por teste de jateamento ($cm^3/N-s$)	1.1	1.9
LAT_SED.hru	Concentração de sedimento no fluxo lateral e no fluxo de água subterrânea	0	5000

Fonte: Arnold et al. (2012).

Tabela 3.6 – Parâmetros de calibração de nitrato e valores limites.

Parâmetros Nitrato	Descrição	Valores	
		MIN	MAX
ERORGN.hru	Razão de enriquecimento do NO ₃ para carregado no sedimento	0	5
SHALLST_N.gw	Concentração inicial de nitrato em aquífero subterrâneo (m^3/m^3)	0	50000
LAT_ORGN.gw	N orgânico no fluxo de base (mg/L)	0	200
CDN.bsn	Taxa de coeficiente de desnitrificação exponencial	0	3
RCN.bsn	Concentração de N na chuva (mg N/L)	0	15
CMN.bsn	Taxa de mineralização de nutrientes orgânicos (N e P)	0.01	0.03
SDNCO.bsn	Limite da desnitrificação anaeróbio	0	1
NPERCO.bsn	Percolação do coeficiente de nitrato	0	1
RSDCO.bsn	Coeficiente de decomposição do resíduo	0.02	0.1
SOL_ORGN(1).chm	Concentração inicial de N na camada do solo (ppm)	0	100
BIOMIX.mgt	Eficiência da mistura biológica	0	1

Fonte: Arnold et al. (2012).

Tabela 3.7 – Parâmetros de calibração de ortofosfato e valores limites.

Parâmetros Fósforo	Descrição	Valores	
		MIN	MAX
RSDIN.hru	Cobertura inicial de resíduo (kg/ha)	0	10000
PPERCO.bsn	Coeficiente de percolação do fósforo (10 m ³ /mg)	10	17.5
PSP.bsn	Índice de disponibilidade do fósforo	0.01	0.7
RSDCO.bsn	Coeficiente de decomposição do resíduo	0.02	0.1
SOL_ORGP(1).chm	Concentração inicial de P na camada do solo (ppm)	0	100
ERORGP.hru	Razão de enriquecimento do PO para carregado no sedimento	0	5
GWSOLP.gw	Contribuição da concentração de P solúvel em águas subterrâneas para os rios (ppm)	0	1000
AI2.wwq	Fração da biomassa de algas que é P (mg/P mg al)	0.01	0.02
MUMAX.wwq	Crescimento de algas a 20°C (<i>dias</i> ⁻¹)	1	3
RHOQ.wwq	Respiração de algas a 20°C (<i>dias</i> ⁻¹)	0.05	0.5

Fonte: Arnold et al. (2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Calibração e validação da vazão e sedimentos

As sub-bacias aqui representadas foram nomeadas de acordo com o número das estações de monitoramento em seus exutórios (3.1). As 10 saídas de vazão foram parametrizadas simultaneamente. O intervalo de cada parâmetro no processo de calibração foi escolhido de acordo com a literatura. Neste trabalho foram adotadas as funções objetivas de NS, PBIAS e RMSE que tiveram resultados “muito bom” nas estações 1, 3 e 9, “bom” nas estações 2, 4, 5, 6, 7 e 10 (Tabela 4.1). O coeficiente de determinação (r^2) foi alto (0,9, Figura 4.1) e a equação linear mostra que o modelo subestima a descarga em 9%. Os Parâmetros mais sensíveis foram CN (PAST), CANMX, GW_DELAY, CN (urbano) e RCHRGDP (Tabela 3.4).

Incertezas relevantes foram identificadas nas bacias 4, 6 e 10 (Figura 4.2). Os fatores p e r (p -factor e r -factor) se situam, em pelo menos um deles, nas faixas de valores considerados satisfatórios para cada exutório da sub-bacia. A exceção se aplica à bacia 9 que por ser uma vazão controlada, atende perfeitamente aos critérios estatísticos. De um modo geral, as incertezas são devidas a simplificação conceitual, como por exemplo a curva SCS para particionamento da vazão e também a processos que ocorrem em uma sub-bacia próxima que não são considerada no modelo, não sendo incluído aos dados de entrada da bacia estudada (DAKHLALLA; PARAJULI, 2019). Esta incerteza tem maiores chances de ocorrer em bacias de área extensa, o que explicaria alguns dos erros encontrados neste trabalho.

Figura 4.1 – Gráfico dos dados observados e simulados considerando todas as sub-bacias. A linha tracejada é a função de identidade e a linha contínua é a relação entre os dados observados e os dados simulados. r^2 é o coeficiente de determinação.

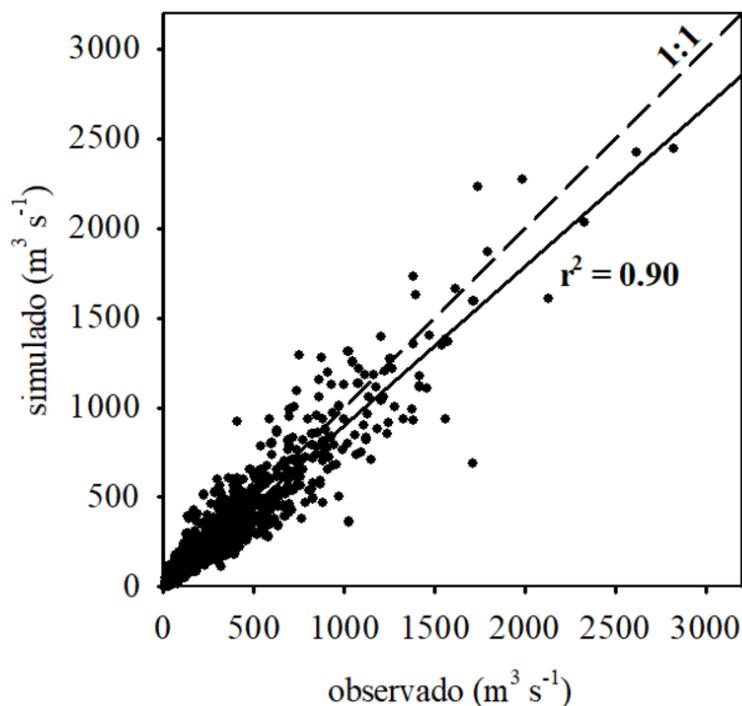


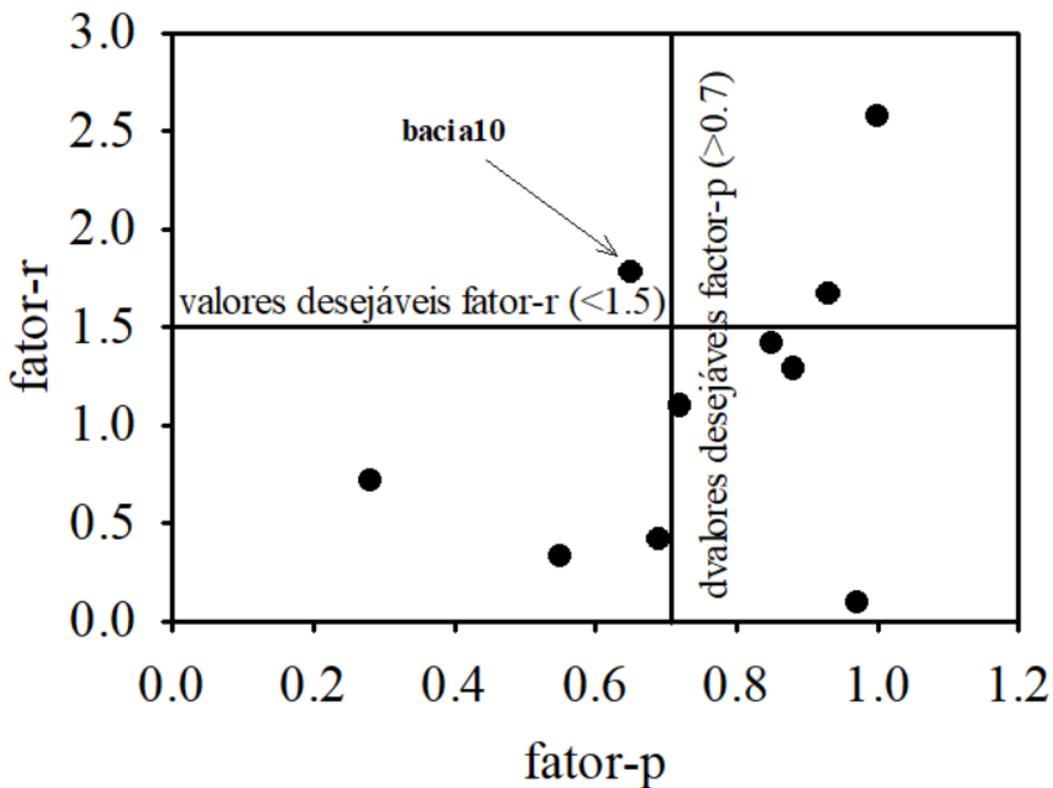
Tabela 4.1 – Resultados das funções objetivas utilizadas para avaliar o desempenho do modelo para cada sub-bacia analisada.

Sub-bacia	r^2	NS	PBIAS	RSR	Média simulada	Média Observada	Legenda
1	0.8	0.79	-7.71	0.45	616.46	667.99	Muito bom
2	0.73	0.71	0.10	0.54	87.26	87.14	Bom
3	0.83	0.8	0.50	0.44	122.4	121.81	Satisfatório
4	0.73	0.75	-6.58	0.54	338.87	366.73	Não satisfatório
5	0.65	0.63	-4.30	0.61	35.88	37.48	
6	0.69	0.69	-1.10	0.56	168.99	170.84	
7	0.77	0.70	-0.90	0.55	198.09	199.96	
8	0.54	0.52	-4.00	0.70	148.32	154.49	
9	0.99	0.99	0.10	0.08	75.1	72.1	
10	0.45	0.14	0.40	0.93	29.13	29.01	
Sedimento	0.64	0.63	-17.16	0.61	88432	106756	
Nitrogênio	0.55	0.20	-28.20	0.89	543393	756996	
Fósforo	0.70	0.70	-3.80	0.55	34027	35375	

Fonte: Produção do Autor.

A calibração e validação dos valores de sedimentos é representada por uma estação localizada próxima ao exutório da bacia, na cidade de Campos – RJ. Esta estação de monitoramento também indica a carga de sedimentos exportadas pela bacia do Rio Paraíba do Sul para o oceano. O resultado do transporte de sedimentos é considerado “bom” de acordo com as funções objetivas (Tabela 4.1).

Figura 4.2 – Gráfico de duas medidas de incerteza (fator-p e fator-r) para diferentes saídas do modelo no procedimento de calibração e validação. Linhas de referência indicam a faixa desejável de valores para os fatores.



4.2. Vazão, transporte de sedimentos e nutrientes

As características do rio principal analisadas pelo modelo foram vazão, sedimento e nutrientes; fósforo na espécie de PO_4 e nitrato na espécie de NO_3 . A calibração e validação destas características foram realizadas de acordo com cada estação que representasse o melhor valor de acordo com a função

objetiva (Tabela 3.3). Os melhores valores para os parâmetros calibrados para a vazão estão apresentados Tabela 4.2.

A bacia localizada a montante (bacia 10) é uma bacia pequena e com poucas áreas urbanas, onde predomina cobertura natural de pastagens na região mais alta da bacia. Os valores baixos nas funções objetivas para a vazão modelada podem estar relacionados às chuvas formadas pela umidade transportada do oceano para as montanhas. Cabe destacar que, com exceção da bacia onde o rio deságua, a sub-bacia 10 é a mais próxima do litoral. A influência destas chuvas não reflete na medição da estação pluviométrica, pois ela se localiza na região central da sub-bacia 10. Embora NS e SRS sejam insuficientes para atingir os critérios de funções objetivas, os gráficos representam bem a dinâmica dos períodos de estiagem ou seca (Figura 4.3). Uma análise mais detalhada utilizando SWAT para esta sub-bacia foi executada em ARGUELO (2016) onde uma subdivisão desta bacia em áreas menores se provou eficiente para uma melhor representação da vazão do modelo. A contribuição desta sub-bacia para a vazão total do Rio Paraíba do Sul é de 4.3% quando se considera a estação de Campos como exutório da bacia.

As sub-bacias 7, 8 e 9 foram as bacias com maior complexidade para calibração. A vazão nestes trechos é influenciada por dois reservatórios controlados que se encontram a montante da estação de monitoramento 9, ou seja, se trata de uma sub-bacia onde o valor real da vazão é igual ao valor modelado (Figura 4.3), não havendo influência dos eventos que possam ocorrer em bacias anteriores. Além disso, a região é caracterizada por ser plana e conter uma vasta região de turfeiras, principalmente a sub-bacia 8, o que aumenta a complexidade do transporte de água no solo. Para solucionar este problema, à sub-bacia 8, foi adicionado o parâmetro WET_FR, ligado à presença de áreas alagáveis no solo, deste modo a simulação considera que uma porcentagem da área do solo é uma área alagada, o que se provou efetivo para melhorar os valores simulados aos observados no modelo.

Conseqüentemente, a eficácia do modelo para simular a descarga na bacia hidrográfica 8 foi relativamente baixa (NS = 0,52, PBIAS = -4,00 RSR = 0,70),

principalmente por causa das simplificações inerentes aos modelos, por exemplo, método do de curva número em área alagável. Ainda, outras características influenciaram na capacidade do modelo como a complexidade da rede de drenagem do rio principal neste local, devido às áreas alagáveis antes da estação de monitoramento de descarga e à limitação de dados sobre o uso da água em uma das áreas mais densamente povoadas do Brasil (cerca de 150 habitantes km², IBGE 2010). Esta parte da bacia hidrográfica compreende uma região com vegetação ripária desmatada (AGEVAP, 2006) e intensa operação de mineração de areia (ROMERO SIMI et al., 2009; CARLOS et al., 2014) que aumenta os processos de erosão (OSBORNE; KOVACIC, 1993) e conseqüentemente aumenta o transporte de sedimentos fluviais (PACHECO et al., 2017; KHAN; ALI, 2013) e custos de tratamento de água (DEARMONT; MCCARL; TOLMAN, 1998). A saída dessas bacias hidrográficas (exutório 7, 3.1) representa cerca de 17% do aporte total da bacia para o oceano.

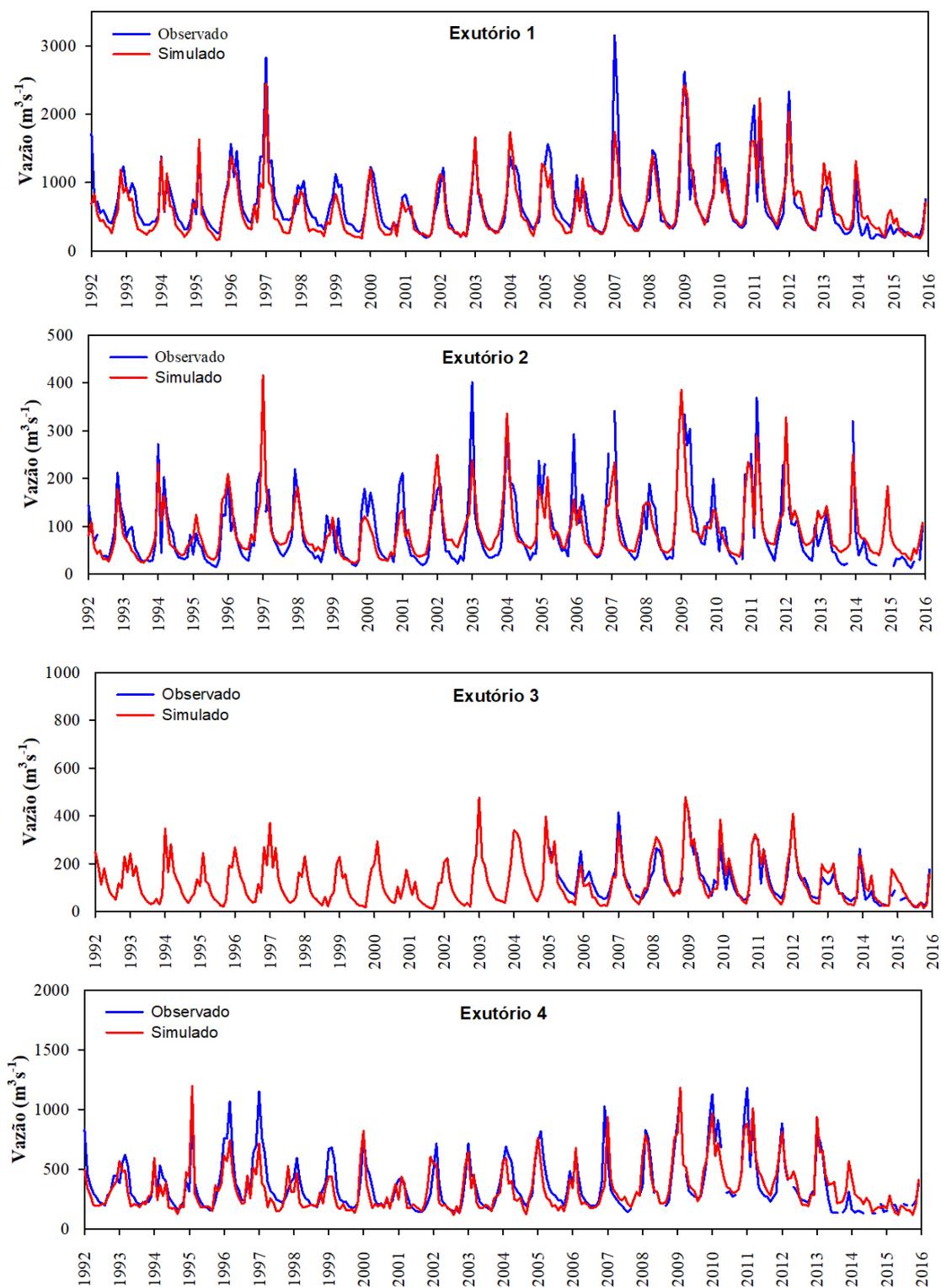
As bacias hidrográficas 2, 3, 5 e 6 sofrem uma menor influência de atividades antrópicas intensas, as atividades existentes são pequenas centrais hidrelétricas a fio d'água. Essas bacias têm um papel importante para o Rio Paraíba do Sul porque suas descargas representam cerca de 65% da vazão total para o oceano. Os rios da bacia são muito bem simulados mesmo com o complexo relevo da região, à bacia 6 porém foi acrescentado o parâmetro de CH_S(2) referente a declividade do canal principal, indicando que nesta bacia o relevo tem importância na calibração do modelo.

A vazão da bacia hidrográfica 4 tem grande influência da transposição do Paraíba do Sul para o Rio Guandu. Cerca de 160 m³/s são transpostos, o que representa cerca de 70% da vazão total no rio principal neste ponto. A água é transposta para a maior estação de tratamento de água do mundo (ET Guandu) para abastecer cerca de 80% da população da região metropolitana do Rio de Janeiro. Após o ponto de transposição, a água restante no Rio Paraíba do Sul flui para a confluência com outros dois rios importantes, Rio Paraibuna (bacia hidrográfica 5) e Rio Piabanha (bacia hidrográfica 6). Este trecho do rio é surpreendentemente bem simulado (considerando a

transposição, NS = 0,63, PBIAS = -4,30, RSR = 0,61), mesmo com a intensa interferência ao longo do curso do rio.

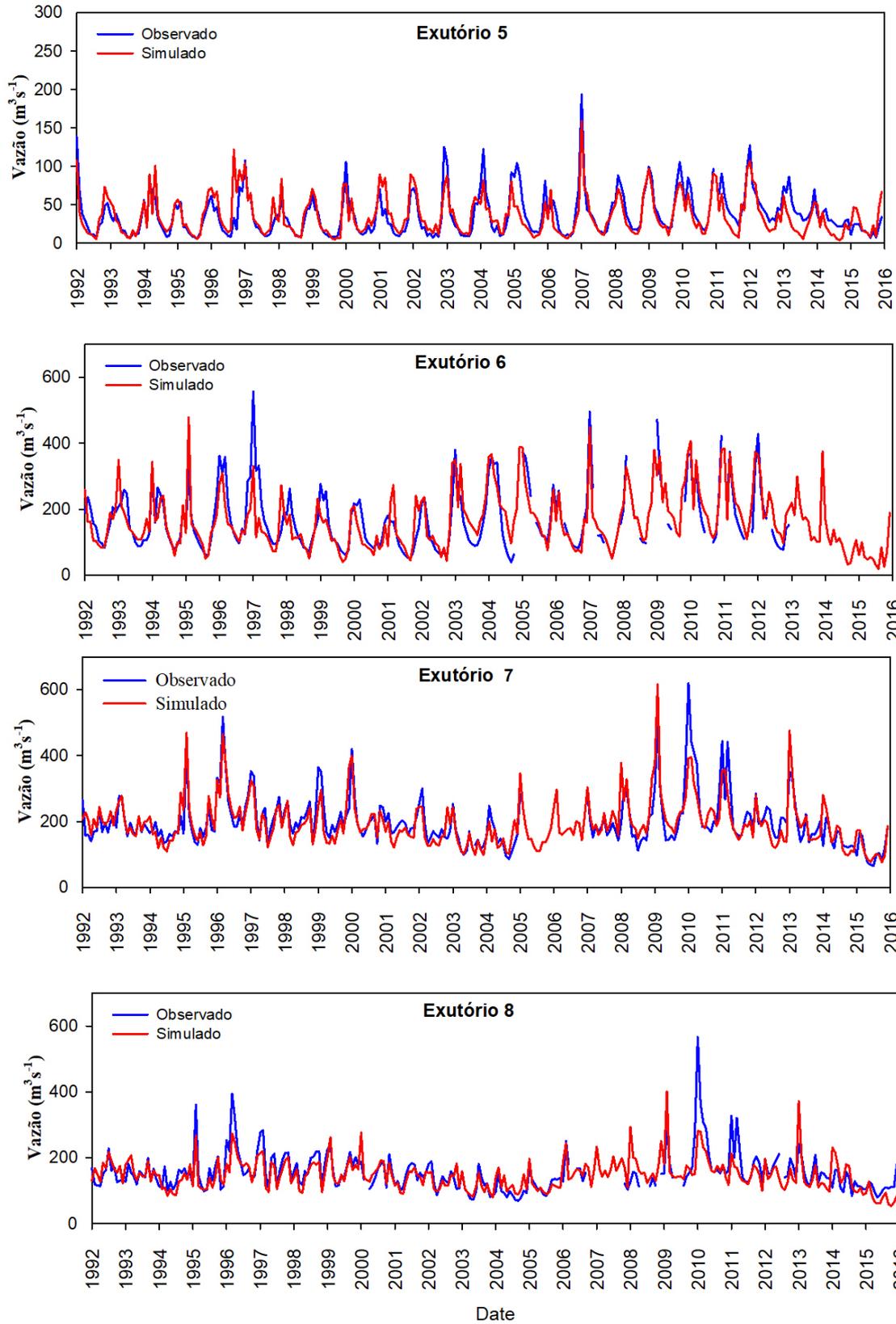
O trecho final do rio recebe águas do Rio Muriaé e Pomba (bacias 2 e 3 respectivamente) antes de alcançar a foz do rio no município de São João da Barra – RJ. A simulação da descarga final tem bons valores para as funções objetivas mesmo com a complexidade dos rios e bacias acima e as atividades industriais e agrícolas ao longo da bacia.

Figura 4.3 – Valores de vazão observada e simulada durante o período de 1992 e 2015.



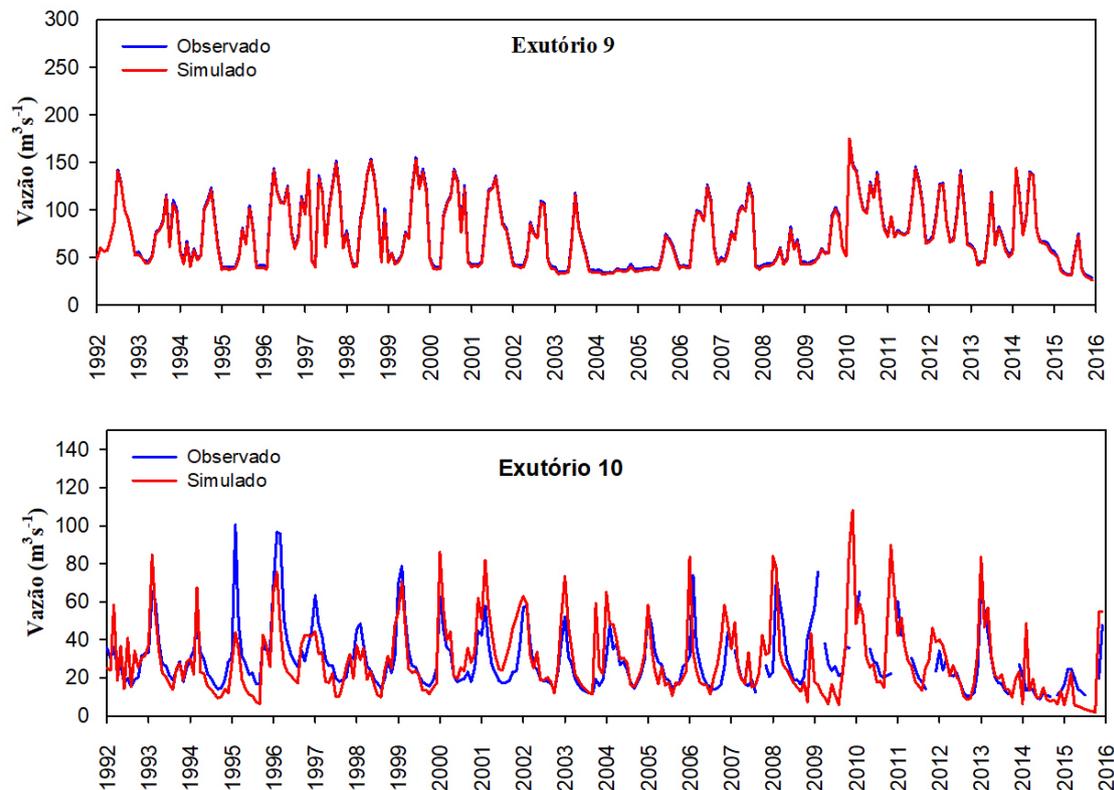
continua

Figura 4.3 – Continuação.



continua

Figura 4.3 – Conclusão.



A simulação do transporte de sedimentos na estação de monitoramento a jusante representa a transferência total de massa para o oceano (Figura 4.4). Os melhores valores dos parâmetros de sedimento estão apresentados na Tabela 4.3. Em geral, o modelo se ajustou bem ao transporte de sedimentos observado nas estações seca e úmida. Além disso, as maiores reduções no fluxo de sedimentos ocorrem onde o escoamento superficial médio é também reduzido.

Os fatores principais a causar alterações na vazão e sedimentos dos rios: construção de barragens, alterações na captação, mineração de areia, desmatamentos e mudanças climáticas (WALLING; FANG, 2003; WALLING, 2006). Todas essas forçantes são presentes na bacia do Rio Paraíba do Sul.

A vazão da estação de Paraibuna, (ponto 9, na Figura 3.2) por exemplo, é totalmente controlada pela barragem (exutório 9, Figura 4.5), sendo o

modelado e o medido iguais. As barragens além de controlar a vazão, influenciam em todo material particulado presente na água pois assim que é criado um lago artificial, a velocidade da água diminui, aumentando as taxas de deposição do material em suspensão no local (DIAS et al., 2005). Como os reservatórios, transposições também afetam o regime hidrológico de um rio. Experimentos mostram que a taxa de deposição de metais no estuário do Paraíba do Sul foi alterada durante a transposição do para o Rio Guandú (GODOY et al., 2013). As grandes construções ao longo do Rio Paraíba do Sul, transposição para o rio Guandu e as represas de Santa Branca, Paraibuna e Funil são pretéritas ao período de análise deste trabalho (CARLOS et al., 2014) e não influenciaram no resultado desta modelagem.

Apesar de haver exploração de areia no rio, não foi necessário adicionar parâmetro relativo a esta atividade, pois o resultado dos sedimentos se mostrou bom, porém os principais focos de extração de areia se encontram distantes do ponto de monitoramento (ROMERO SIMI et al., 2009) e os sedimentos podem se depositar em locais anteriores ao local de observação.

Os resultados para nitrato apresentam boa correlação com os dados medidos em períodos chuvosos (Figura 4.6), nos períodos de seca estes bons resultados não se repetem. É importante salientar que dentre as principais fontes de nitrato: fertilizantes, adubo e fixação natural, todas são transportadas por via difusa, sendo mais suscetíveis a ação de estações chuvosas. Nos períodos secos, a poluição pontual pode representar uma importante contribuição de nutrientes para os ambientes aquáticos. Essa poluição é oriunda de efluentes urbanos, constantes e independentem do regime pluviométrico.

Outro fator que poderia explicar este fenômeno, é a molécula do nitrato ser um ânion facilmente passível de ser lixiviado, porém o modelo apresenta um valor de 0,41 para NPERCO (Tabela 4.4). O parâmetro NPERCO controla o montante de nitrato removido por lixiviação da superfície do solo relativo a percolação, variando de 0,01 a 1, quanto mais próximo de 0, maior a concentração de nitrato no escoamento, se o valor for próximo a 1, a superfície

mantem a mesma concentração de nitrato independente do escoamento superficial (NEITSCH et al., 2009). Logo, a melhor simulação do modelo considerou o valor um acima do pre-definido pelo modelo (caso este parâmetro não seja incluído, o modelo por *default* insere o valor de 0,2) limitando a lixiviação.

Tabela 4.2 - Melhores Valores médios dos parâmetros utilizados na calibração de Vazão.

Vazão	Melhor valor médio
CN2.mgt (FRST)	35
CN2.mgt (AGRO)	74
CN2.mgt (URBN)	77
CN2.mgt (PAST)	43
RCHRG_DP.gw	0.59
ALPHA_BF.gw	0.39
GWQMN.gw	2234.12
GW_REVAP.gw	0.17
GW_DELAY.gw	112.75
REVAPMN.gw	320.75
ESCO.hru	0.55
CH_K2.rte	178
CANMX.hru	61.45

Fonte: Produção do Autor.

Tabela 4.3 - Melhores Valores dos parâmetros utilizados na calibração de sedimentos.

Sedimentos	Melhor valor
CH_COV2.rte	35
CH_N2.rte	74
USLE_P.mgt	77
USLE_C{1}.plant.dat	43
USLE_C{12}.plant.dat	0.59
SPCON.bsn	0.39
SPEXP.bsn	2234.12
CH_BNK_KD.rte	0.17
CH_BED_KD.rte	112.75
LAT_SED.hru	320.75

Fonte: Produção do Autor.

Tabela 4.4 – Melhores valores dos parâmetros utilizados na calibração do nitrato.

Parâmetros Nitrato	Melhor valor
ERORGN.hru	0.983
SHALLST_N.gw	516.666
LAT_ORGN.gw	16.833
CDN.bsn	0.116
RCN.bsn	8.025
CMN.bsn	0.0015
SDNCO.bsn	0.592
NPERCO.bsn	0.416
RSDCO.bsn	0.0346
SOL_ORGN(1).chm	648.833
BIOMIX.mgt	0.516

Fonte: Produção do Autor.

Tabela 4.5 – Melhores valores dos parâmetros utilizados na calibração do fósforo.

Parâmetros para PO_4^{3-}	Melhor valor
RSDIN.hru	4505.325
PPERCO.bsn	12.540
PSP.bsn	0.243
RSDCO.bsn	0.082
BC4.swq	0.370
SOL_ORGP(1).chm	346.795
ERORGP.hru	2.131
GWSOLP.gw	0.032
A12.wwq	0.031
MUMAX.wwq	1.635
RHOQ.wwq	0.374
SOL_SOLP().chm	1.550

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.4 – Valores de transporte de sedimento (M ton) observado e simulado para o exutório mais a jusante da bacia (exutório 1).

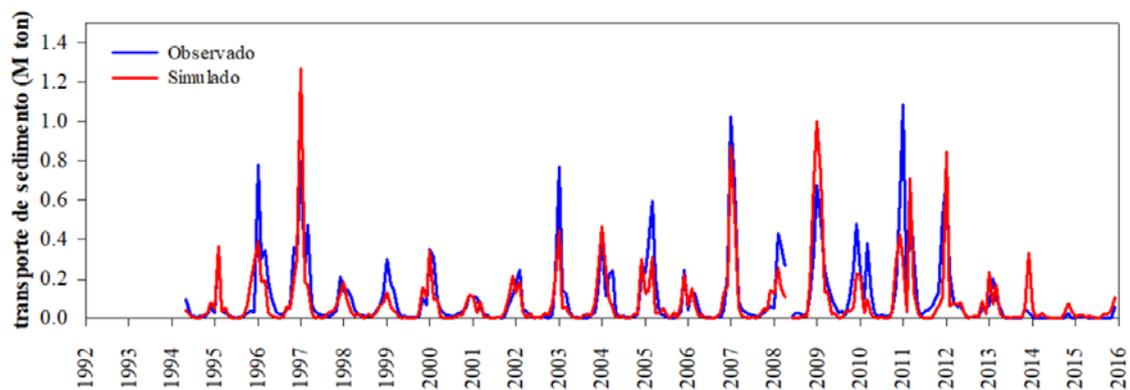


Figura 4.5 – Valores de transporte de nitrato (kg) observado e simulado para o exutório mais a jusante da bacia (exutório 1).

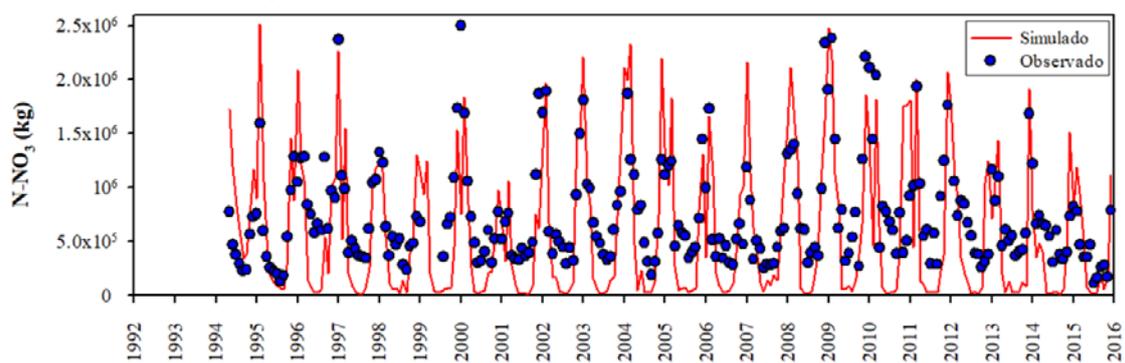
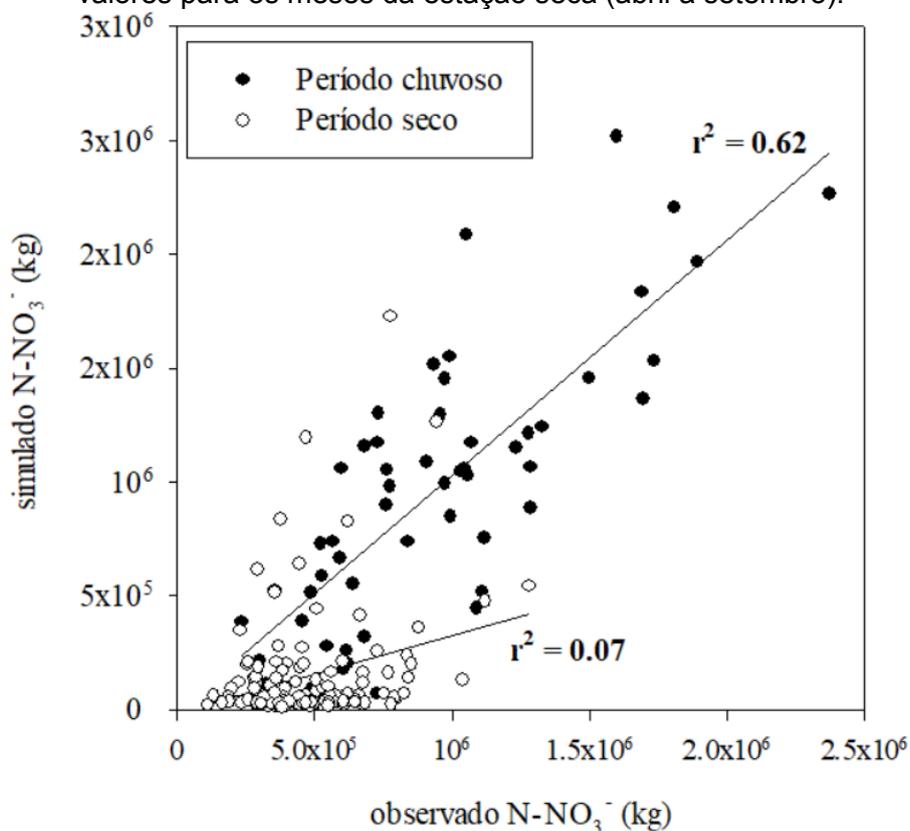


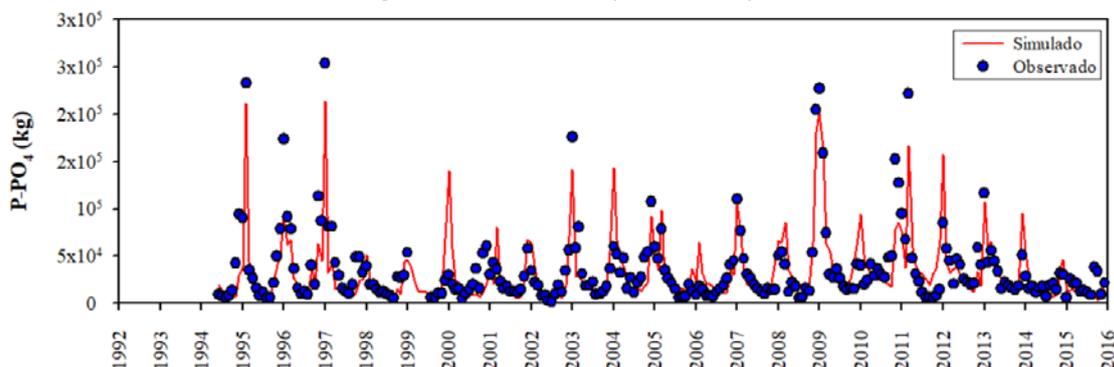
Figura 4.6 – Relação entre o transporte de nitrato (kg) observado e simulado. Os pontos em preto representam os valores para os meses da estação chuvosa (outubro a março). Os pontos em branco representam os valores para os meses da estação seca (abril a setembro).



O fósforo é um nutriente importante na eutrofização (TUNDISI; TUNDISI, 2012) e o reservatório de Funil tem um histórico de formação de fitoplâncton devido a presença de orofosfato (RANGEL et al., 2012), a origem deste nutriente é principalmente de poluição pontual de eflúvios urbanos, as áreas com maiores manchas urbanas são aquelas a montante do reservatório do funil. Mesmo com consumo alto de fósforo pelas bactérias aquáticas, o modelo representou bem o processo utilizando 3 parâmetros específicos para bactérias com valores medianos ao limite proposto (AI2, MUMAX e RGOQ na Tabela 4.5).

O modelo representou bem todo o período analisado mas especialmente o período seco de 2013 a 2015 (Figura 4.7).

Figura 4.7 - Valores de transporte de ortofosfato (kg) observado e simulado para o exutório mais a jusante da bacia (exutório 1).



Embora a intervenção humana tenha impactado diversas características da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul ao longo de décadas, o modelo SWAT mostrou-se uma ferramenta eficiente para simular o transporte de sedimentos ao longo do tempo. Com as recentes discussões sobre o gerenciamento da água nessa bacia, incluindo a transposição da bacia do Rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira, sistema este que foi seriamente afetado pelo recente déficit hídrico ocorrido no estado de São Paulo nos anos de 2013-2015, a importância de entender e simular os efeitos de eventos extremos na vazão do rio se torna ainda mais imprescindível (MARENGO; TOMASELLA; NOBRE, 2017). Dado o histórico recente de acidentes com rios, como o Rio Doce (HATJE et al., 2017) e Brumadinho (FLÁVIO et al., 2019), modelos como este aqui apresentados são importantes para o gerenciamento dos recursos hídricos. No entanto, ainda são insuficientes os estudos sobre a disponibilidade futura de água na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, o que coloca em dúvida a segurança hídrica regional.

4.3. Exemplos de uso do modelo na análise de cenários

Com os resultados da calibração e validação do modelo, foram aplicados cenários demonstrando a influência de duas obras realizadas no curso do rio: A Represa de Paraibuna, exutório da sub-bacia 9; e a transposição do Rio Paraíba do Sul para o sistema Guandu, localizada na sub-bacia 4. Em ambos

os casos, foram analisados os efeitos destas obras sobre a vazão do Rio Paraíba do Sul.

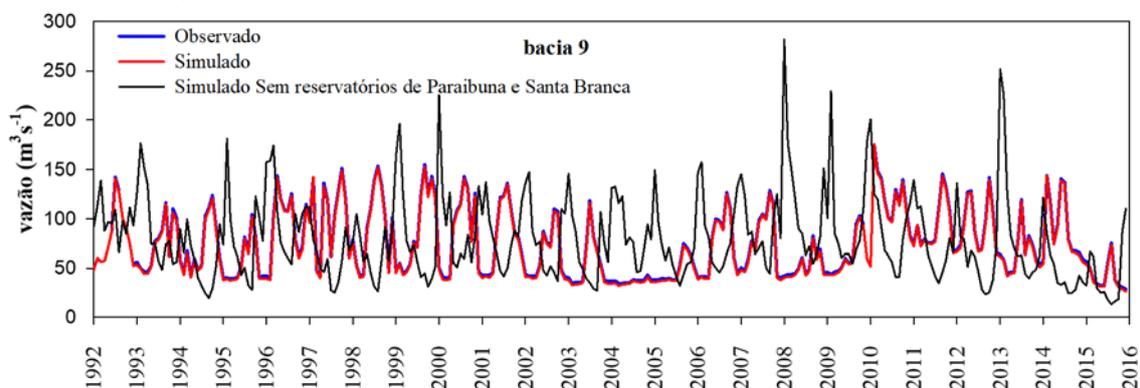
4.3.1. Reservatório de Paraibuna

A represa de Paraibuna é controlada por uma barragem inaugurada em 1978 período anterior ao analisado neste trabalho. Em sua jusante se situa o reservatório de Santa Branca, inaugurado em 1999. O regime de vazão do Rio Paraíba do Sul no ponto 9 é controlado pela demanda hídrica para geração de energia elétrica, deste modo, durante os períodos de menor pluviosidade, a água pode ser represada para que haja produção contínua de energia elétrica.

Em um cenário sem a presença das represas, nota-se a influência das mesmas sobre o ciclo natural da vazão do rio, pois nesta condição a vazão aumenta em períodos chuvosos e diminui nos períodos secos (Figura 4.8). Quando comparados os cenários com represa e sem represa, os valores de vazão são defasados. Os picos de cheia no cenário sem represa coincidem com os baixos valores na simulação com a barragem, e o contrário, picos de cheia nos valores simulados com barragem coincidem com as baixas vazões no cenário sem a barragem.

Neste sentido, a barragem é importante para o controle de secas ou cheias. conforme o valor simulado sem os reservatórios do início dos anos de 2008 e 2013 demonstram, haveria vazões recordes no ponto 9 e os valores simulados e observados indicam que a barragem preveniu possíveis enchentes a jusante da barragem. Também é possível observar que as barragens foram importantes no controle da seca de 2014, mantendo uma vazão alta onde seria uma sequência de vazões baixas.

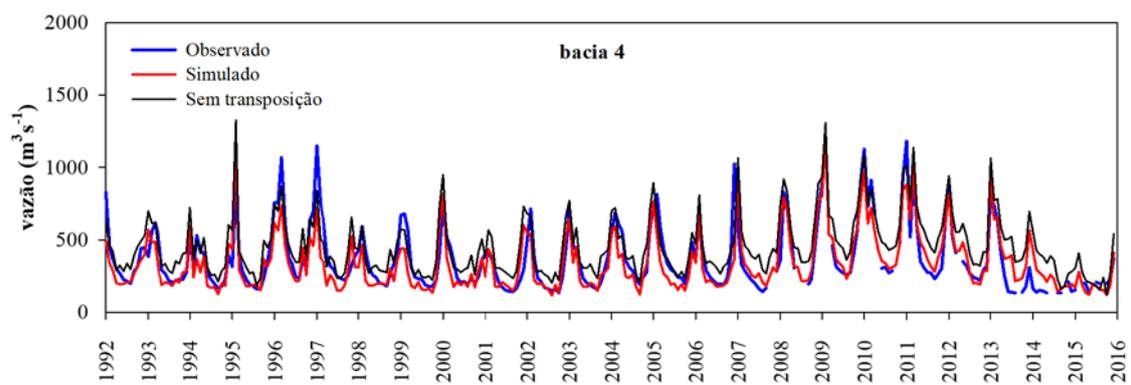
Figura 4.8 – Sub-bacia 9 com cenário de ausência dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca.



4.3.2. Sistema Guandu

Com média mensal de $160 \text{ m}^3/\text{s}$ de retirada de água do Rio Paraíba do Sul, os efeitos do Sistema Guandu sobre a vazão do Rio Paraíba do Sul são notados principalmente nos períodos de seca, em que o cenário sem a transposição permite que a vazão seja maior que os valores simulados (Figura 4.9). Ao longo da série histórica, os picos de alta vazão coincidem entre o cenário simulado sem a transposição e o simulado pelo modelo, porém é observado no período de seca entre meados de 2013 e o fim de 2016 que a transposição foi um agravante para a baixa vazão no ponto 4, onde picos de cheia não foram coincidentes, indicando que houve uma retirada maior que a média histórica.

Figura 4.9 – Sub-bacia 4 com cenário de ausência da transposição para o sistema Guandu.



5 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi calibrar e validar o SWAT para a bacia do Rio Paraíba do Sul e testar sua performance como simulador de vazão ao longo dos rios principais da bacia e do Rio Paraíba do Sul, bem como testar a modelagem para a quantidade de nitrogênio e fósforo exportada ao oceano. Os resultados da calibração e validação foram muito bons para vazão, sedimentos e fósforo, embora os resultados de nitrogênio não tenham sido satisfatórios durante o período seco. Nos períodos secos, a poluição pontual de origem urbana pode representar uma importante contribuição no aporte de nutrientes, pois este tipo de poluição é constante e independe de regime pluviométrico para ocorrer.

Dado o interesse político-econômico que existe no Paraíba do Sul para o país, este modelo é muito útil em futuras pesquisas que tracem cenários e pautem políticas públicas para a região, principalmente ao considerar casos onde o regime pluviométrico é suscetível a variações extremas, como o período seco experimentado entre os anos de 2013 e 2015, onde o modelo interpretou muito bem o evento atípico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe : Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, 2015.
- ABBASPOUR, K. C.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. **Journal of Hydrology**, v.352, n.1/2, p. 30–49, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018**: informe anual. Brasília: ANA, 2018. 72p.
- ARGUELO, F. V. P. **Simulação hidrológica da Bacia do Rio Paraitinga para análise das potenciais causas do evento extremo de cheia e desastre ocorrido na passagem do ano de 2009/2010**. 2016. 106 p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.
- ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSVEN, A. VAN; VANLIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. Swat: model use, calibration, and validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. A 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. 1–27, 2015.
- DAKHLALLA, A. O.; PARAJULI, P. B. Assessing model parameters sensitivity and uncertainty of streamflow, sediment, and nutrient transport using SWAT. **Information Processing in Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 61–72, 2019.

DEARMONT, D.; MCCARL, B. A.; TOLMAN, D. A. Costs of water treatment due to diminished water quality: a case study in Texas. **Water Resources Research**, v. 34, n. 4, p. 849–853, 1998.

DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M.; RIBEIRO, R. L. D.; ABOUD, A. C. S.; PEREIRA, M. G.; RUMJANEK, N. G. História ambiental do Vale do Paraíba Paulista, Brasil. **Revista Biociências**, Taubaté, v.20, n.1, p. 12–29, 2014.

DIAS, N. W.; BATISTA, G. T.; TARGA, M. S.; CATELANI, C. S. Análise da carga de sedimentos da represa de paraibuna com base em dados multiespectrais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005. **Anai...** 2005.

FIGUEIREDO FILHO, A. Y.; MANFREDINI, S.; PACHECO, A. Novas metodologias para coleta e manutenção de amostras de água para análises microbiológicas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 2., 2011, São Paulo. **Anais...** 2011..

FILOSO, S.; MARTINELLI, L. A.; WILLIAMS, M. R.; LARA, L. B.; KRUSCHE, A.; BALLESTER, M. V.; VICTORIA, R.; CAMARGO, P. B. D. E. Land use and nitrogen export in the Piracicaba River basin, Southeast Brazil. **Biogeochemistry**, v.65, n.3, p. 275–294, 2003.

FLÁVIO, L.; BARROS, G.; MORATO, R.; GUIMARÃES, F. Impacts from the tailings dam rupture of Brumadinho, Brazil: an analysis based on land cover changes. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.4, n.2, p.122–129, 2019.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 261–279, 2013.

GAREN, D. C.; MOORE, D. S. Curve number hydrology in water quality modeling: uses, abuses, and future directions. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 2, p. 377–388, 2005.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASAE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GODOY, J. M.; LACERDA, L. D.; REZENDE, C. E.; MOREIRA, I.; CARVALHO, Z. L.; WANDERLEY, C. V. A.; GODOY, M. L. D. P. Evaluating sedimentation rates in the estuary and shelf region of the Paraíba do Sul River, southeastern Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 25, n. 1, p. 50–64, 2013.

GRANT, G. E.; SCHMIDT, J. C.; LEWIS, S. L. A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. **A Peculiar River: Water Science and Application**, v.7, p.203-219, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/007WS13>>.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. A. F.; SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10706, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico**. 2010. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/93/cd_2010_caracteristicas_populacao_domicilios.pdf>.

JAKEMAN, A. J.; LETCHER, R. A. Integrated assessment and modelling: features, principles and examples for catchment management. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 6, p. 491–501, 2003.

JAYAWARDENA, A. . **Environmental and hydrological systems modelling**. [S.l.]:CRC, 2014. 191 p. ISBN 13978041546532.

JOHNSON, C. A.; ABBASPOUR, K. C.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340–1352, 2004.

KHAN, N.; ALI, S. A. Evaluation of morphometric parameters: a remote sensing and GIS based approach. **Open Journal of Modern Hydrology**, v.3, p.20-27, 2013.

KONDOLF, G. M. Profile: hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. **Environmental Management**, v. 21, n. 4, p. 533–551, 1997.

KONDOLF, G. M.; RUBIN, Z. K.; MINEAR, J. T. Dams on the mekong: cumulative sediment starvation. **Water Resources Research**, v. 50, n. 6, p. 5158–5169, 2014.

LEHNER, B.; DÖLL, P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal of Hydrology**, v. 296, n. 1/4, p. 1–22, 2004.

LIENIG, D. H. L.; GOLTERMAN, R. S.; OHNSTADT, M. A. M. **Methods for physical and chemical analysis of freshwaters**. 2.ed. Oxford: Blackwell Scientific, 1978.

LIU, X.; ZHANG, Y.; HAN, W.; TANG, A.; SHEN, J.; CUI, Z.; VITOUSEK, P.; ERISMAN, J. W.; GOULDING, K.; CHRISTIE, P.; FANGMEIER, A.; ZHANG, F. Enhanced nitrogen deposition over China. **Nature**, v. 494, n. 7438, p. 459–62, 2013.

MADSEN, J. D.; CHAMBERS, P. A.; JAMES, W. F.; KOCH, E. W.; WESTLAKE, D. F. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. **Hydrobiologia**, v. 444, n. 1, p. 71–84, 2001.

MARENCO, J. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, C. A. Climate change and water resources BT. In: MATTOS BICUDO, C. E.; GALIZIA TUNDISI, J.; SCHEUENSTUHL, M. (Ed.). Cham: Springer, 2017. p. 171–186.

MARGESON, J. H.; SUGGS, J. C.; MIDGETT, M. R. Reduction of nitrate to nitrite with cadmium. **Analytical Chemistry**, v. 52, n. 12, p. 1955–1957, 1980.

MEISSNER, R.; SEEGER, J.; RUPP, H.; BALLA, H. Assessing the impact of agricultural land use changes on water quality. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 2, p. 1–10, 1999.

- MORIASI, D. N.; GOWDA, P. H.; ARNOLD, J. G.; MULLA, D. J.; ALE, S.; STEINER, J. L. Modeling the impact of nitrogen fertilizer application and tile drain configuration on nitrate leaching using SWAT. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 36–43, 2013.
- MORIASI, D.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885, 2007.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009. 2009. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>.
- NUGROHO, P.; MARSONO, D.; SUDIRA, P.; SURYATMOJO, H. Impact of land-use changes on water balance. **Procedia Environmental Sciences**, v. 17, p. 256–262, 2013.
- OSBORNE, L. L.; KOVACIC, D. A. Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management. **Freshwater Biology**, v. 29, n. 2, p. 243–258, 1993.
- PACHECO, F. S.; MIRANDA, M.; PEZZI, L. P.; ASSIREU, A.; MARINHO, M. M.; MALAFAIA, M.; REIS, A.; SALES, M.; CORREIA, G.; DOMINGOS, P.; IWAMA, A.; RUDORFF, C.; OLIVA, P.; OMETTO, J. P. Water quality longitudinal profile of the Paraíba do Sul River, Brazil during an extreme drought event. **Limnology and Oceanography**, v.62, n.S1, p.S131-S146, 2017.
- PEREIRA, D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. 2013. 126p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- PERVEZ, M. S.; HENEGBRY, G. M. Assessing the impacts of climate and land use and land cover change on the freshwater availability in the Brahmaputra River basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 3, p. 285–311, 2015.

PIMENTEL, D.; WOLFE, B.; BERGER, B.; FILIBERTO, D.; POON, E.; ABBETT, E.; KARABINAKIS, E.; NEWTON, M.; CLARK, S.; NANDAGOPAL, S. Water resources: agricultural and environmental issues. **BioScience**, v. 54, n. 10, p. 909–918, 2004.

RANGEL, L.; SILVA, L. S.; ROSA, P.; ROLAND, F.; HUSZAR, V. M. Phytoplankton biomass is mainly controlled by hydrology and phosphorus concentrations in tropical hydroelectric reservoirs. **Hydrobiologia**, v. 693, n. 1, p. 13–28, 2012.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. 158p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. São José dos Campos: INPE, 2000. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf.

ROCHA, E. O.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; DE ASSIS, L. C.; ALVES, L. G. S. The contribution of conservation practices in reducing runoff, soil loss, and transport of nutrients at the watershed level. **Water Resources Management**, v. 26, n. 13, p. 3831–3852, 2012.

ROMERO SIMI, S.; SIMI JUNIOR, R.; FRIEDRICH, B.; RUDORFF, T. Monitoramento e análise da evolução das cavas de areia na várzea do Rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5467–5474.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R. O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

SEITZINGER, S. P.; HARRISON, J. A.; DUMONT, E.; BEUSEN, A. H. W.; BOUWMAN, A. F. Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: an overview of global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19, n. 4, p. 1–11, 2005.

SHEN, Z.; CHEN, L.; HONG, Q.; QIU, J.; XIE, H.; LIU, R. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area. **Science of the Total Environment**, v. 454/455, p. 383–392, 2013.

SHEN, Z.; HONG, Q.; YU, H.; LIU, R. Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China. **Science of the Total Environment**, v. 405, n. 1/3, p. 195–205, 2008.

SHIKLOMANOV, I. A. World Water Resources. A new appraisal and assessment for the 21st century. **United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization**, p. 40, 1998.

SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. **World water resources at the beginning of the Twenty-First Century**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2004. ISBN 9780521617222.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E GEOAMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **SIGA Web**. Disponível em: <<http://sigaceivap.org.br/siga-ceivap/map>>.

TONKIN, J. D.; POFF, N. L.; BOND, N. R.; HORNE, A.; MERRITT, D. M.; REYNOLDS, L. V.; OLDEN, J. D.; RUHI, A.; LYTLE, D. A. Prepare river ecosystems for an uncertain future. **Nature**, jun. 2019.

TOTTI, M. E. F. **Gestão das águas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul: governança, instituição e atores**. 2008. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos de Goytacazes, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. v. 4.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. ISBN 9788570258236.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnology**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2012. ISBN 9780415588355.

USDA SOIL CONSERVATION SERVICE. **National engineering handbook: hydrology**. Washington: U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 1972. Disponível em:

<[http://hdl.handle.net/2027/msu.31293106652757\(chapter1\)](http://hdl.handle.net/2027/msu.31293106652757(chapter1))>.

VALERIANO, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos: INPE, 2002. 54p.

VERBURG, P. H.; SCHOT, P. P.; DIJST, M. J.; VELDKAMP, A. Land use change modelling: current practice and research priorities. **GeoJournal**, v. 61, n. 4, p. 309–324, 2004.

VIESSMAN JUNIOR, W.; L LEWIS, G. **Introduction to hydrology**. [S.l.]: Pearson, 2003.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J. M. Human domination of Earth's ecosystems. **Science**, v. 277, n. 5325, p. 494-499, 1997.

VÖRÖSMARTY, C. J.; MCINTYRE, P. B.; GESSNER, M. O.; DUDGEON, D.; PRUSEVICH, A.; GREEN, P.; GLIDDEN, S.; BUNN, S. E.; SULLIVAN, C. A.; LIERMANN, C. R.; DAVIES, P. M. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, p. 555, 29 set. 2010.

WALLIS, T. W. R.; GRIFFITHS, J. F. An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC).

Agricultural and Forest Meteorology, v. 73, n.1/2, p.115–133, 1995.

WALLING, D. E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. **Geomorphology**, v. 79, n. 3–4, p. 192–216, 2006.

WALLING, D. E.; FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. **Global and Planetary Change**, v. 39, n. 1–2, p. 111–126, 2003.

WANG, G.; YANG, H.; WANG, L.; XU, Z.; XUE, B. Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters. **Hidrological Processes**, v.28, n.3, p. 1032–1042, 2014.

WANDERLEY, C. V. A.; GODOY, J. M.; GODOY, M. L. D. P.; REZENDE, C. E.; LACERDA, L. D.; MOREIRA, I.; CARVALHO, Z. L. Evaluating sedimentation rates in the estuary and shelf region of the Paraíba do Sul River, Southeastern Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.25, n.1, p.50-64, 2014.

WHITE, M. J.; SANTHI, C.; KANNAN, N.; ARNOLD, J. G.; HARMEL, D.; NORFLEET, L.; ALLEN, P.; DILUZIO, M.; WANG, X.; ATWOOD, J.; HANEY, E.; JOHNSON, M. V. Nutrient delivery from the Mississippi River to the Gulf of Mexico and effects of cropland conservation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 69, n. 1, p. 26–40, 2014.

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor**. [S.I.]: U.S. Deptment of Agriculture, 1975. p. 244–252.

XIMING, C.; C., M. D.; S., L. L. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 1, p. 4–17, 2003.

ZHANG, H.; HUANG, G. H.; WANG, D.; ZHANG, X.; LI, G.; AN, C.; CUI, Z.; LIAO, R.; NIE, X. An integrated multi-level watershed-reservoir modeling system for examining hydrological and biogeochemical processes in small prairie watersheds. **Water Research**, v. 46, n. 4, p. 1207–1224, 15 mar. 2012.