



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

RAMIRO FERREIRA DOS SANTOS FARIAS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA
BACIA DO RIO IPANEMA A PARTIR DA PROJEÇÃO DE
CENÁRIOS MODELADOS UTILIZANDO SWAT**

São Cristóvão SE

2020

RAMIRO FERREIRA DOS SANTOS FARIAS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO
IPANEMA A PARTIR DA PROJEÇÃO DE CENÁRIOS MODELADOS
UTILIZANDO SWAT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz

São Cristóvão SE

2020

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

F224a Farias, Ramiro Ferreira dos Santos
Análise do comportamento hidrológico da bacia do Rio Ipanema a partir da projeção de cenários modelados utilizando SWAT / Ramiro Ferreira dos Santos Farias ; orientador Marcus Aurélio Soares Cruz. - São Cristóvão, SE, 2020.
87 f. :il.

Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Sergipe, 2020.

1. Recursos hídricos 2. Ciclo hidrológico. 3. Métodos de simulação. 4. Bacias hidrográficas. 5. São Francisco, Rio, Bacia. I. Cruz, Marcus Aurélio Soares, orient. II. Título.

CDU 556.18:004.942



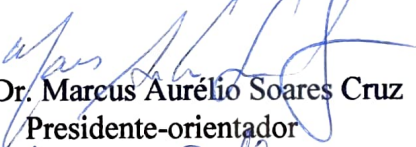
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS
HÍDRICOS



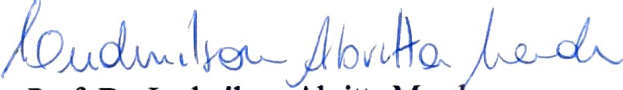
Ata da 75ª Sessão de Defesa Pública de Dissertação de
Mestrado em Recursos Hídricos.

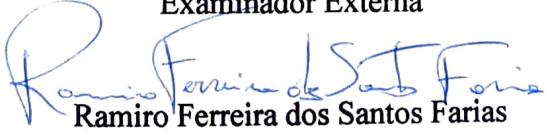
Ao trigésimo dia do mês de março do ano de dois mil e vinte, às quatorze horas, realizou-se por Videoconferência, a sessão pública de defesa de dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos de **Ramiro Ferreira dos Santos Farias**, sob o título: “**Análise do Comportamento Hidrológico da Bacia do Rio Ipanema a Partir da Projeção de Cenários Modelados Utilizando Swat**” presidida pelo Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz (participação à distância por videoconferência). O orientador passou a palavra ao aluno para que procedesse à apresentação de seu trabalho. Após a apresentação, o primeiro examinador, Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes (participação à distância por videoconferência), arguiu o aluno que teve igual período para sua defesa. A palavra foi franqueada ao examinador interno Prof. Dr. André Quintão de Almeida (participação à distância por videoconferência), para a arguição do aluno, que, após as considerações, respondeu aos questionamentos. Em seguida, o Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz, orientador do aluno, teceu comentários sobre o trabalho apresentado. Encerrada a apresentação, a banca examinadora deliberou em sigilo sobre o trabalho do aluno. A comissão decidiu **APROVAR** o aluno, sendo condicionada ao atendimento das recomendações solicitadas pela banca examinadora e da Resolução nº 25/2014/CONEPE que regulamentam a apresentação e defesa de dissertação de Mestrado. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata que será assinada pelos componentes da banca e pelo aluno.

Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, 30 de março de 2020.


Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz
Presidente-orientador


Prof. Dr. André Quintão de Almeida
Examinador Interno


Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes
Examinador Externa

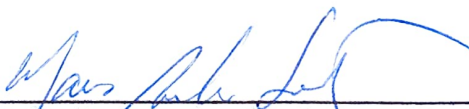

Ramiro Ferreira dos Santos Farias
Aluno

RAMIRO FERREIRA DOS SANTOS FARIAS

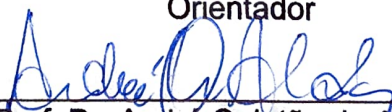
**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO IPANEMA
A PARTIR DA PROJEÇÃO DE CENÁRIOS MODELADOS UTILIZANDO SWAT**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Recursos Hídricos
como um dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Recursos Hídricos

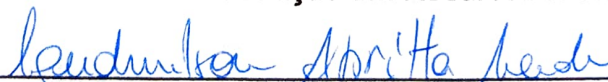
Aprovada: 30 de março de 2020



Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos
Orientador



Prof. Dr. André Quintão de Almeida
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

São Cristóvão-SE

2020

Dedico este trabalho aos meus filhos, Luís Ramiro e João Miguel. E a todos aqueles sonhadores como eu, do passado, do presente e do futuro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao criador de tudo e de todas as coisas, a energia que me moveu, mesmo nos momentos mais críticos, não só pelo movimento, mas pelo despertar da consciência, para que me mantivesse firme em meus propósitos.

À minha esposa Kleckstane, por tudo, por me acompanhar nos caminhos difíceis..., saltamos diversos obstáculos, vamos pular montanhas e um dia alçar voos juntos.

A Dona Enilde Gondim Farias, por sua boa-fé me ajudou direta e indiretamente nestes últimos anos de dificuldades e desafios, ao seu inestimável suporte e fé, muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz, sem o qual chegar até este momento não teria sido possível, pela orientação, confiança, apoio.

À minha mãe a Senhora Maria de Lourdes Ferreira dos Santos, pela vida, por ser minha salvação, meu apoio frequente, meu abrigo.

As minhas Tias, Maria da Conceição (*in memoriam*) e Maria do Carmo, sem as quais a vida teria sido um desafio muito mais árduo e certamente eu não estaria vivendo esse momento.

Aos colegas que fiz e aos que por um motivo ou outro não se tornaram colegas ou amigos, pelos momentos vividos, pelos desafios enfrentados, pelos conflitos vencidos ou apaziguados. Para cada momento uma lição, um aprendizado diferente, o meu respeito. Aos queridos minha eterna gratidão e admiração.

A todos os Professores e colaboradores do PRORH, na pessoa do Prof. Dr. Inajá Francisco de Sousa por todo o conhecimento e por suas respectivas contribuições à minha formação.

À Universidade Federal de Sergipe - UFS, na pessoa do Magnífico Reitor Prof. Dr. Ângelo Roberto Antonioli, por seus serviços, esta nobre instituição abriga os sonhos e intentos científicos e profissionais de gerações, é para mim motivo de orgulho ser egresso de um de seus cursos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, ao governo e ao povo brasileiro que sustentam com suor os valerosos custos para a qualificação dos filhos desta pátria, seja por meio do investimento em infraestrutura institucional, seja pelas bolsas de demanda social, amparo a pesquisa e a produção acadêmica, da qual fui beneficiário.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para que este momento me fosse possível.

“Observei ao encontro do firmamento com as águas do mar, me senti pequeno demais para tocá-lo, esquecendo-me que a mesma água que tocava o céu, lambia meus pés em ondas”

Frases de rua, autor desconhecido.

RESUMO

O desmatamento da Caatinga é uma das principais agressões ao ambiente no semiárido brasileiro. Este desmatamento prejudica toda a dinâmica ambiental e interfere diretamente no comportamento hidrológico de uma bacia. Em função disto, neste estudo foi realizada a calibração do modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Uma tentativa de simular eventos e cenários ocorrentes na Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema (BHRI) sub-bacia do Rio São Francisco. A finalidade foi avaliar tendências de como as alterações de cobertura e uso do solo interferem no regime de vazões do Rio Ipanema, já bastante impactado pela ação do homem. Foram considerados quatro cenários de simulação de uso e cobertura do solo entre os anos de 1980 e 2016, totalizando 37 anos de simulação. Foram eles: condições de cobertura real (cenário atual), utilizando um raster de cobertura e uso de 2011 da série MAPBIOMAS 4.0, e três cenários extremos projetados, considerando conversão total em pastagem, em floresta e em áreas agricultáveis. As configurações foram realizadas utilizando a ferramenta Land Use Update (.LUP) do QSWAT, após o procedimento de calibração e validação do modelo. A calibração alcançou um NSE de 0,61, PBIAS de -8,5 e um R^2 de 0,62, sendo considerada aceitável para prosseguir com a simulação, porém a validação não obteve bom resultado atingindo um NSE de 0,45, PBIAS de -6,27 e um R^2 de 0,50, estes problemas ocorreram em função da pouca disponibilidade de dados de vazão e monitoramento hidrológico além da má qualidade dos dados disponíveis. A modelagem também propiciou a obtenção de outras informações relativas ao espaço geográfico da BHRI, como por exemplo: predominância de tipos de solos com destaque para os neossolo litólico eutrófico (24,84%), neossolo regolítico eutrófico (25,21%), planossolo háplico eutrófico (40,70%); principais tipos de cobertura e uso, sendo o pasto responsável por cobrir 63% do território da bacia, florestas 28% com a maior parte em áreas de proteção permanente; e declividade predominante na faixa de 3% a 8% com 40% do terreno, de 0% a 3% com 30%, e de 8% a 20% com 19% do terreno. Quanto aos cenários simulados, o cenário de cobertura por florestas foi responsável por elevar, de maneira mais significativa, as taxas de evapotranspiração ($\Delta < 35$ mm Atual, e $\Delta > 45$ mm Florestas), fluxo de água subterrâneo ($\Delta < 37$ mm Atual, e $\Delta > 40$ mm Florestas) e produção de água da bacia ($\Delta < 45$ mm Atual, e $\Delta > 47$ mm Florestas), em contraponto ao cenário atual e de cobertura total por pastagem com as menores taxas para estas variáveis. Ao analisar a produção de sedimentos na bacia, a influência dos cenários muda passando a predominar a agricultura com a maior produção de sedimentos, e a floresta com a menor produção de sedimentos ($\Delta > 0.045$ t/ha Agricultura, e $\Delta < 0.01$ t/ha Florestas). Cabe ponderar que o desmatamento, a mecanização, a desagregação do solo e o plantio e irrigação mal planejados podem ocasionar a perda de solos, isso significa geração e transporte de sedimentos em direção aos cursos d'água. Tal contexto reforça a importância da manutenção e preservação das matas nativas em áreas estratégicas como as matas ciliares e áreas de amortecimento e preservação permanente no entorno de lagos, lagoas, reservatórios e nascentes. O cenário atual da BHRI é preocupante, posto que, do ponto de vista dos recursos hídricos evidencia uma situação de escarcas de água que compromete a afluência no canal principal do rio e por consequência a disponibilidade hídrica para a população, para a agricultura e para a dessedentação animal. O modelo da BHRI no SWAT alcançou resultados favoráveis e têm potencial para novas pesquisas relacionadas ao manejo e cobertura do solo versus a produção de água. Também cabem novos estudos da pedologia e geologia da área da bacia com finalidade de avaliar a influências destes caracteres geomorfológicos sobre os recursos hídricos na BHRI.

Palavras-chave: SWAT; Modelagem Hidrológica; Rio Ipanema; Rio São Francisco.

ABSTRACT

Caatinga deforestation is one of the main aggressions to the environment in the Brazilian semiarid region. This deforestation harms all the environmental dynamics and directly interferes with the hydrological behavior of a basin. As a result, this study carried out the calibration of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model. An attempt to simulate events and scenarios occurring in the Rio Ipanema River Basin (BHRI) sub-basin of the São Francisco River. The purpose was to evaluate trends in how changes in coverage and land use interfere with the flow regime of the Ipanema River, which has already been greatly impacted by man. Four scenarios of land use and land cover simulation were considered between 1980 and 2016, totaling 37 years of simulation. They were: real coverage conditions (current scenario), using a coverage raster and 2011 use of the MAPBIOMAS 4.0 series, and three extreme projected scenarios, considering total conversion to pasture, forest and agricultural areas. The settings were made using the QSWAT Land Use Update (.LUP) tool, after the calibration and model validation procedure. The calibration reached an NSE of 0.61, PBIAS of -8.5 and an R^2 of 0.62, being considered acceptable to proceed with the simulation, however the validation did not obtain a good result reaching an NSE of 0.45, PBIAS of -6, 27 and an R^2 of 0.50, these problems occurred due to the low availability of flow data and hydrological monitoring in addition to the poor quality of the available data. The modeling also made it possible to obtain other information related to the geographical space of BHRI, such as: predominance of soil types with emphasis on the eutrophic litholic neossol (24.84%), eutrophic regolithic neossol (25.21%), planossol eutrophic haploid (40.70%); main types of cover and use, the pasture being responsible for covering 63% of the basin's territory, forests 28% with the majority in permanent protection areas; and predominant slope in the range of 3% to 8% with 40% of the land, 0% to 3% with 30%, and 8% to 20% with 19% of the land. As for the simulated scenarios, the forest cover scenario was responsible for raising, in a more significant way, the evapotranspiration rates ($\Delta < 35$ mm Current, and $\Delta > 45$ mm Forests), underground water flow ($\Delta < 37$ mm Current, and $\Delta > 40$ mm Forests) and water production in the basin ($\Delta < 45$ mm Current, and $\Delta > 47$ mm Forests), in contrast to the current scenario and total coverage by pasture with the lowest rates for these variables. When analyzing the sediment production in the basin, the influence of the scenarios changes, with agriculture with the highest sediment production predominating, and the forest with the lowest sediment production ($\Delta > 0.045$ t / ha Agriculture, and $\Delta < 0.01$ t / ha Forests). It is worth considering that deforestation, mechanization, soil disaggregation and poorly planned planting and irrigation can cause soil loss, this means generation and transportation of sediments towards the water courses. This context reinforces the importance of maintaining and preserving native forests in strategic areas such as riparian forests and areas of buffering and permanent preservation around lakes, lagoons, reservoirs and springs. BHRI's current scenario is worrying, since, from the point of view of water resources, it evidences a situation of water scarcity that compromises the affluence in the main channel of the river and consequently the water availability for the population, for agriculture and for the animal watering. BHRI's SWAT model achieved favorable results and has the potential for further research related to soil management and cover versus water production. New studies on pedology and geology in the basin area are also needed to assess the influence of these geomorphological characters on water resources at BHRI.

Keywords: SWAT; Hydrological Modeling; Ipanema River; São Francisco River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Carta de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema - BHRI.	27
Figura 2 - Recorte político dos municípios dos ALPE inseridos na BHRI.	28
Figura 3 - Zoneamento climatológico de Alagoas e Pernambuco com destaque para a BHRI.	29
Figura 4 - Reclassificação dos raster de cobertura e uso do solo referente ao ano de 2011 obtidos a partir da Coleção 4 do MapBiomias.	41
Figura 5 - Cobertura e uso da terra conforme o IBGE para a BHRI em 2014.	42
Figura 6 - Cenários para simulação dos efeitos hidrológicos das alterações de cobertura e uso do solo na BHRI.	43
Figura 7 - Distribuição de tipos solos e pontos de sondagem no território brasileiro com destaque para bacia do Rio Ipanema elaborado a partir do banco de dados geográficos do IBGE.	45
Figura 8 - Rede de monitoramento hidroclimático da BHRI.	51
Figura 9 - Delimitação da sub-bacia hidrográfica modelada na BHRI.	57
Figura 10 - Carta da Rede de Drenagem e Plano de Altimetria da BHRI.	63
Figura 11 - Aplicações diversas para o MDE.	64
Figura 12 - Composição da carta de declividade do terreno.	65
Figura 13 - Taxas percentuais por tipo de cobertura no ano de 2011.	66
Figura 14 - Tipos de solo.	68
Figura 15 - Gráficos comparativos entre séries históricas de precipitações reais e as séries sintéticas geradas por Xavier para as mesmas coordenadas e estações.	70
Figura 16 - Séries históricas de vazões em duas estações fluviométricas da ANA em operação na BHRI.	71
Figura 17 - Gráfico dos fatores P-Value e T-Stat relacionado à determinação da sensibilidade global dos parâmetros processados pelo SWAT-CUP 2012 ao modelo.	72
Figura 18 - Distribuição percentual das áreas da bacia por faixa de elevação em metros.	74
Figura 19 - Vazões simuladas ajustadas as vazões observadas versus precipitações.	76
Figura 20 - Valores acumulados anuais médios para os quatro cenários de cobertura e uso do solo simulados com o modelo da BHRI no SWAT.	77
Figura 21 - Média anual mensal da evapotranspiração máxima por cenário simulado.	79
Figura 22 - Média anual mensal do fluxo hídrico profundo por cenário simulado.	80
Figura 23 - Média anual mensal da produção de água por cenário simulado.	80
Figura 24 - Média anual mensal da produção de sedimentos por cenário simulado.	81

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 UM BREVE PANORAMA DE DISPONIBILIDADE DE RECURSOS HÍDRICOS NO NORDESTE BRASILEIRO E A IMPORTÂNCIA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	16
2.2 A BACIA HIDROGRÁFICA	19
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS, COMPUTACIONAIS E SUAS APLICAÇÕES EM HIDROLOGIA.....	20
3 METODOLOGIA	27
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPANEMA (BHRI)	27
3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT).....	30
3.2.1 Fase do terreno	32
3.2.1.1 Equação do equilíbrio.....	32
3.2.1.2 Clima	33
3.2.1.3 Hidrologia.....	33
3.2.1.4 Cobertura do terreno/crescimento vegetal.....	35
3.2.1.5 Erosão.....	36
3.2.1.6 Nutrientes	36
3.2.1.7 Pesticidas	36
3.2.2 Fase do ciclo hidrológico	37
3.2.2.1 Propagação no canal principal ou extensão.....	37
3.2.2.2 Propagação no reservatório	38
3.3 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS PLANIALTIMÉTRICOS	39
3.4 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE COBERTURA E USO	40
3.5 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS PEDOLÓGICOS	44
3.6 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS HIDROCLIMÁTICOS	48
3.7 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO NO SWAT	53
3.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO	58
3.9 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E EFICIÊNCIA DO MODELO	61
4 ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	63
4.1 PRODUTOS EXTRAÍDOS DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DA BHRI	63

4.2 COBERTURA E USO DO SOLO	65
4.3 LEVANTAMENTO PEDOLÓGICO	67
4.4 LEVANTAMENTO HIDROCLIMÁTICO	70
4.5 ANÁLISE SENSIBILIDADE, INDICADORES DE QUALIDADE E CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	72
4.6 RELATÓRIOS E SIMULAÇÕES GERADOS PELO QSWAT	74
5 CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A água possui papel fundamental em todas relações homem natureza, sua disponibilidade é fator essencial para sobrevivência humana, para as atividades fabris e econômicas, além da manutenção do equilíbrio ambiental. O acesso à água constitui-se em uma necessidade básica a sobrevivência e à garantia da dignidade da pessoa. Além do exposto, os conflitos pelo uso dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica são comuns em função da disponibilidade dos recursos, conforme foi demonstrado por Maneta *et al.* (2009) quando confrontou as demandas da agricultura, do abastecimento e da geração de energia hidrelétrica e os conflitos pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF). O Rio São Francisco percorre a maior bacia integralmente brasileira. Muito importante para a economia, possui uma área total de aproximadamente 630,00km², e possui um curso d'água com extensão próxima de 2860 km, percorre regiões com muita diversidade climática (Maneta *et al.*, 2009).

Segundo consta no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco divulgado pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e Agência Peixe Vivo (2016), a BHRSF enfrenta muitos conflitos relacionados a disponibilidade hídrica e a gestão dos seus recursos hídricos. Um dos seus importantes afluentes no baixo curso, o Rio Ipanema, localizado na região do semiárido e permeando os territórios dos Estados de Pernambuco e Alagoas, é fortemente impactado pela poluição, pela pouca precipitação e pela exploração de suas margens para agricultura e pastoreio. Além disso, segundo aponta o relatório não há uma tendência de solução a médio e longo prazo, pois não se evidencia progresso na solução dos problemas de poluição registrados nos últimos anos. Os problemas existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema (BHRI) são agravados pela escassez de água, pela má gestão e pelo choque de interesses políticos. Mas um problema que impacta toda a bacia de forma acentuada é a má gestão do solo e dos desmatamentos, falhas nas condutas de uso da terra, e degradação da cobertura vegetal. Este é um problema que não atinge somente os grandes cursos da bacia, as piores consequências se manifestam sobre os pequenos contribuintes da bacia.

Um dos fatores mais importantes para a manutenção do regime hidrológico preservado em uma bacia hidrográfica é a conservação das matas e florestas desta bacia, o desmatamento para utilização da madeira, ou mesmo para a agricultura e agropecuária impacta fortemente o solo, este que é a grande caixa d'água da natureza. Ou seja, alterações da cobertura

da terra bem como o uso que é dado a terra impactam diretamente sobre a disponibilidade hídrica dos mananciais em uma bacia. Logo, surge uma pergunta, como favorecer a manutenção do regime hidrológico da BHRI, e a revitalização dos rios, riachos, prover a preservação ambiental e o aporte de água nos pequenos mananciais sem entrar em conflito direto com a agricultura e outras atividades humanas?

Em seu estudo Kobiyama *et al.* (2016) diz que a bacia hidrográfica deveria fundamentalmente ser adotada como unidade de estudo e planejamento, sua importância se dá pelo fato que se tornaria fácil gerir uma unidade onde todos os recursos naturais estivessem integrados e fáceis de se reconhecer e manejar. Assim, tal forma de fazer gestão dos recursos hídricos em uma bacia estaria ligada ao manejo integrado deste espaço geográfico. Uma boa resposta pode ser dada pela gestão ambiental e pelo zoneamento agroecológico das áreas em uma bacia. A modelagem ambiental pode favorecer enormemente tomada de decisão em relação aos potenciais hidrológicos e de usos da terra, pois os modelos ambientais se apresentam como ferramentas valiosas ao buscarmos estudar e compreender como se processam os fenômenos físicos no ambiente natural geograficamente delimitado (Baltokoski, Tavares, *et al.*, 2010).

A simulação de cenários hidrológicos utilizando modelos hidrológicos favorece a economia de tempo e de recursos em um projeto, porém necessita de séries de dados confiáveis como garantia de bons resultados (Brighenti *et al.*, 2015). Um modelo pode retornar bons resultados, mas não é capaz de produzir a informação, ele apenas processa. Segundo Tucci (2005), um modelo é uma simplificação, uma abstração, de um objeto ou sistema complexo, com a finalidade de facilitar o uso, a compreensão e a obtenção de respostas para diferentes entradas. O modelo hidrológico é uma ferramenta científica destinada a facilitar a compreensão dos fenômenos hidrológicos e a qualidade da informação de saída depende dos dados com os quais o modelo é alimentado.

O SWAT é um modelo de domínio público desenvolvido em conjunto pelo *Agricultural Research Service of United States Department of Agriculture* (USDA-ARS) e pela *Texas A & M AgriLife Research*, parte do *Texas A & M University System*. É um modelo em escala de bacia hidrográfica para simular a qualidade e a quantidade de águas superficiais e subterrâneas e prever o impacto ambiental do uso da terra, práticas de manejo da terra e mudanças climáticas. O SWAT está sendo amplamente usado na avaliação, prevenção e controle da erosão do solo, controle de poluição de fontes não pontuais e gestão regionalizada em bacias hidrográficas (Arnold, Kiniry, *et al.*, 2012).

Trata-se de um modelo capaz de simular grandes lapsos temporais, permite processar dados de qualidade e quantidade da água, projetar cenários, a partir de dados de propriedades da terra, topografia, clima, cobertura vegetal, uso e ocupação da terra e manejo das bacias (Jung, Kim, 2018). Segundo Arnold *et al.* (2012) o SWAT foi desenvolvido para simular o impacto da mudança do uso do solo em bacias hidrográficas de médio e grande porte. Além disto o modelo também possibilita simular as consequências das alterações ambientais sobre a qualidade da água. Dado o exposto, o SWAT será utilizado neste trabalho.

Este trabalho é importante, pois atende a necessidade de aprofundar os estudos sobre a bacia hidrográfica do Rio Ipanema e avaliar a consequência do desmatamento em sua área, sobre a produção de água, o escoamento superficial e subterrâneo, a produção de sedimentos e a evapotranspiração. E a partir da aplicação do modelo SWAT à uma bacia do semiárido brasileiro, avaliar as respostas do modelo para condições características dessa região do país, por meio da simulação de cenários de uso e cobertura da terra.

Objetivo deste estudo foi avaliar se as alterações do uso e cobertura do solo no âmbito da BHRI são capazes de provocar mudanças na dinâmica hidrológica e sedimentar do rio ao longo dos anos, a partir de cenários simulados por meio do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Obter parâmetros do SWAT para a bacia hidrográfica do Rio Ipanema; determinar as taxas de evapotranspiração e fluxo hídrico na bacia hidrográfica; quantificar a produção de água e sedimentos para diferentes cenários de uso e cobertura; e avaliar a possibilidade da obtenção de produtos cartográficos derivados das saídas do modelo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 UM BREVE PANORAMA DE DISPONIBILIDADE DE RECURSOS HÍDRICOS NO NORDESTE BRASILEIRO E A IMPORTÂNCIA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Segundo consta no relatório anual sobre Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil elaborado e publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2018), a variabilidade espaço-temporal da distribuição das precipitações no território brasileiro se dá em função das dimensões continentais do país. Os trabalhos com dados de precipitações médias relativizam muito a informação da distribuição das chuvas no país. Logo, a precipitação anual média do Brasil que em 2017 foi de 1.760 mm, não reflete a variação total anual, em toda extensão do território nacional, da chuva que vai de menos de 500 mm no semiárido nordestino e ultrapassa os 3.000 mm na região amazônica (ANA, 2018).

O clima do Nordeste Setentrional é caracterizado por elevadas temperaturas, baixa pluviosidade e marcado pela irregularidade do regime de precipitações. Estes fatores configuram o estado de escassez hídrica do Nordeste Setentrional, com 88 % do território no semiárido (Estados como o Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco). Em função dos baixos volumes de chuva entre os anos de 2012 a 2017 as recargas dos reservatórios foram reduzidas, provocando um rápido deplecionamento dos reservatórios devido ao atendimento das demandas de água dos diversos usos.

A seca se apresentou tão severa na Região Hidrográfica (RH) do Rio São Francisco (SF) que o tempo de retorno das vazões em praticamente em todas as estações fluviométricas ultrapassou os 100 anos. Este cenário demandou ajustes na vazão defluente dos reservatórios do SF, que foi reduzida para 580 m³/s, para evitar o colapso do sistema de reservação. Algumas localidades apresentaram redução histórica de 100% nas vazões, ou seja, vazões nulas, em algumas RHs do Atlântico Nordeste Oriental e São Francisco (ANA, 2018).

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) é considerada a maior bacia totalmente inserida no território brasileiro, cobre aproximadamente 630.000 km², e seu curso principal percorre uma extensão de cerca de 2860 km, cobrindo diversas regiões climáticas. Possui importância estratégica principalmente por seus potenciais hidrelétricos, de irrigação e para abastecimento humano. Porém demanda de captação de água na bacia hidrográfica do SF cresce à medida que a agricultura irrigada se intensifica (Hunt, Stilpen, *et al.*, 2018).

Muitos estudos trazem informações que demonstram que as demandas de água para irrigação são crescentes no mundo. Em suas pesquisas Rivas-Tabares *et al.* (2019) discorrem acerca das demandas hídricas europeias que hoje atingem 32% das captações totais de água doce destinadas ao atendimento da Agricultura, somente no sul europeu as captações para suprimento de irrigação atingem os 52% das captações totais. Em climas semiáridos as demandas para agricultura podem chegar a 80% das captações totais o que por diversas vezes pode acarretar em disputas e conflitos pela água.

Segundo Uniyal *et al.* (2019), há previsão de que mais de 52 países terão que enfrentar uma grave crise hídrica até 2025, em função de questões climáticas, de gestão dos recursos hídricos e do rápido crescimento populacional que impactará diretamente sobre a demanda por alimentos. Em torno de 70% dos recursos hídricos do mundo são utilizados para manutenção da agricultura, variando em cerca de 10% na Europa para aproximadamente 90% no sul da Ásia. Levando-se em conta que a agricultura irrigada sofreu expansão para próximo dos 480% (47,3 a 276,3 Mha) desde o século passado, sendo a maior concentração e aumento em países em desenvolvimento com maior taxa de crescimento populacional, e economia baseada na comercialização de commodities agrícolas; é notável um contexto de elevado risco para os Estados do Nordeste brasileiro em função da escarces, da má gestão e elevação das demandas por abastecimento de água e alimentos.

O aumento das demandas hídricas é consequência direta do crescimento da população e das atividades dependentes do uso de quantidades elevadas de água. Dentre as regiões de maior criticidade em relação ao stress hídrico estão as regiões do Atlântico Nordeste Oriental, com maior parte do território semiárido, e as regiões Atlântico Leste e São Francisco, em função do crescimento das demandas contrapondo a disponibilidade histórica (ANA, 2018).

Além disso, o confronto da necessidade de água intensificada pela condição de crise hídrica provocada pela seca, com as pressões antrópicas sobre a BHRSF, que castigam enormemente com a degradação ambiental por lançamento de esgotos, desmatamento de suas margens e áreas de recarga, manejo inadequado das terras cultivadas e pastagens, manejo inadequado dos seus recursos hídricos (Maneta, Torres, *et al.*, 2009), é um fator que eleva as tensões sociais e políticas no Nordeste brasileiro.

Ao falar em secas o Nordeste desponta de imediato como referência, 38 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens em 2017 no país, superando em mais de 13 vezes os eventos de cheias. Aproximadamente 80% das pessoas atingidas vivem em Estados do Nordeste, onde Bahia, Ceará e Pernambuco respondem por 55,5% do montante. A ANA (2018) registrou um leve aumento no volume armazenado nos reservatórios dos Estados do Nordeste

Setentrional no ano de 2017, contudo este aumento não foi o suficiente para suprir o déficit de 0,6% no armazenamento do Reservatório Equivalente, sendo que este é uma abstração que abrange os reservatórios com capacidade maior que 10 milhões de m³ nos estados da Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte, e observando a tendência do Nordeste, e notável a diferença histórica do volume armazenado em 2018 em comparação a 2013.

Em seu trabalho, Hunt, Stilpen e Freitas (2018) buscaram trazer à discussão algumas das causas e impactos mais importantes sobre a crise energética e hídrica no Brasil. As pesquisas apontaram que as crises do setor de hidroelétrico no mundo são causadas por diferentes razões, como desastres, mercados de energia não regulamentados, demanda rápida por eletricidade e investimentos lentos, crise macroeconômica e as secas.

A pesquisa destacou que o Brasil é periodicamente atingido por uma crise energética, com uma frequência de 10 a 15 anos, assim se destacam os anos de 1924, 1944, 1955, 1964, 1986, 2001 e 2015. Historicamente, o setor de energia no Brasil tem sido afetado por crises energéticas variáveis em proporções temporais e abrangências geográficas. Em geral, as crises energéticas brasileiras estão associadas aos fenômenos climáticos, logo, uma seca pode ter consequências muito sérias para o país, observado que o Brasil tem sido historicamente muito dependente da hidroeletricidade.

Ressalte-se, contudo, que não é apenas uma questão de seca o que impacta na produção energética ou agrícola de uma bacia, e sim todo um conjunto de práticas. Em seu estudo Suttles *et al.* (2018) avaliou como os efeitos da combinação da elevação da urbanização, mudanças nos cenários de cobertura e uso da terra, mudanças climáticas entre outras demandas da gestão ambiental, poderiam afetar o regime hidrológico da bacia do Rio *Yadkin-Pee Dee* na Carolina do Norte (Estados Unidos) utilizando o SWAT.

A bacia hidrográfica é mais que simplesmente o espaço geográfico onde se processam as etapas do ciclo hidrológico, em função de sua importância é que ela deve ser entendida como base para qualquer planejamento de uso dos recursos hídricos considerando quaisquer intervenientes aos resultados pretendidos, cabendo para tanto defini-la seja por critérios científicos teóricos ou práticos, sejam por meio da abstração matemática e computacional, é necessário defini-la.

2.2 A BACIA HIDROGRÁFICA

Segundo Almeida (2013), a bacia hidrográfica é parte de um sistema aberto que possibilita a troca de matéria e energia entre suas vizinhanças, onde ocorrem partes do ciclo hidrológico, e diversos processos físicos que vão dar origem às variáveis como a vazão, a infiltração, a percolação, evaporação, o escoamento superficial, o fluxo de base, entre outras, necessárias para a determinação da disponibilidade e quantidade de água. Além de diversos processos químicos e biológicos que afetam diretamente a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, bem como o equilíbrio das relações ecológicas e ambientais.

Schiavetti e Camargo (2002) relatam que o conceito de bacias hidrográficas tem sido ampliado e rediscutido ao longo dos anos e de acordo com novas abordagens interpretativas resultante da integração das ciências e do objetivo da análise. A bacia hidrográfica pode ser então observada como uma unidade de planejamento, para o gestor público com foco nos múltiplos usos do recurso hídrico, bem como sob o ponto de vista dos ecólogos e biólogos como ecossistemas, ou do ponto de vista do engenheiro hidrólogo como um conjunto de elementos característicos do relevo que influenciam no escoamento superficial e geodinâmico da água. Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), lei nº 9.433/97, a bacia hidrográfica é “a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (Brasil, 1997).

Cardoso *et al.* (2006) caracterizam a bacia hidrográfica como unidade integrada de planejamento, onde os fatores antrópicos provenientes da urbanização, agricultura, industrialização, e elementos da biota, como fauna e flora, interagem com elementos físicos da subsuperfície do planeta, como a pedologia e as características topográficas, e com os fenômenos atmosféricos do clima local, as variações de umidade e precipitação, a temperatura, etc. sendo que a resultante destas interações influencia diretamente na dinâmica ambiental. Segundo os autores, a delimitação da bacia hidrográfica é parte fundamental para análises hidrológicas e que o advento da tecnologia e dos sistemas de informações geográficas, possibilitaram a produção de modelos confiáveis do ambiente natural como os modelos digitais de elevação (MDEs), que favoreceram o trabalho de planejamento espacial urbano e rural, além da prospecção e manejo dos recursos naturais disponíveis.

Para modelagem é fundamental definir o que vem a ser a bacia hidrográfica, como identificar este espaço geográfico de maneira sistêmica. Na concepção de Tuccí (2014), a bacia hidrográfica constitui-se de um sistema físico que recebe o aporte de um volume de água

advindo da precipitação, e a saída é parte deste volume de entrada contabilizadas as perdas intermediárias por evapotranspiração, infiltração. Compõe-se basicamente de um conjunto de vertentes que formam os cursos d'água constituintes de uma rede de canais que conduzem o volume para um único ponto exutório. A bacia se comporta como um sistema possuindo variáveis de entrada, como a precipitação, a radiação solar, a velocidade dos ventos, o tipo de cobertura e uso do solo, tipo de solo. Cada uma destas variáveis influencia no regime hídrico, gerando saídas distintas para cada tipo de bacia. Desta forma a bacia também pode ser modelada e definida enquanto uma abstração matemática ou computacional, para facilitar o seu estudo e compreensão.

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS, COMPUTACIONAIS E SUAS APLICAÇÕES EM HIDROLOGIA

Ao tratar da modelagem do escoamento, Tucci (2014) define dois grandes grupos de modelos matemáticos que podem se apresentar como objeto de estudo e desenvolvimento de aplicações em hidrologia: Modelos lineares e não lineares; Modelos empíricos e conceituais. Os modelos são lineares quando a sua equação diferencial é linear e seus coeficientes não dependem das variáveis do modelo, nem de x , nem de y , nem de t (Equação 1).

$$A_n \frac{d^n x}{dt^n} + A_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + A_1 \frac{dx}{dt} + A_0 x = y(t) \quad \text{Equação 1}$$

Quando pelo menos um dos seus coeficientes é dependente de alguma variável do modelo, o mesmo não é linear.

Os modelos conceituais são aqueles que levam em consideração toda uma gama de processos físicos reais ocorrentes em uma bacia, o próprio SWAT é um modelo conceitual, pois considera variáveis que representam fenômenos ocorrentes na bacia, por exemplo precipitação, evapotranspiração e variações na cobertura vegetal, e parâmetros que representam as características reais da bacia como a área, declividades e comprimento dos canais. Já os modelos empíricos, geralmente dão origem aos ditos modelos caixa preta, se utilizam de funções que não estão relacionadas aos processos ocorrentes na bacia, porém são capazes de se ajustar aos conjuntos de dados, processando-os com equações empíricas, a exemplo de regressões e/ou interpolações, séries de Fourier, etc., para então gerar saídas satisfatórias aos conjuntos de dados de entrada.

Tucci (2014) ainda cita três outros tipos de modelos usuais:

Os modelos lineares conceituais que utilizam as equações do escoamento e podem ser do tipo armazenamento, de onda cinemáticas, distribuídos e dinâmicos. Estes modelos necessitam de ter suas equações linearizadas para o cálculo do escoamento.

Os modelos lineares empíricos têm origem no hidrograma unitário, seja ele instantâneo ou discreto, quando suas ordenadas necessitam de métodos empíricos e equacionamento que representem o comportamento do hidrograma.

Por fim os modelos não-lineares e conceituais divergem dos modelos lineares conceituais apenas por utilizar as equações do escoamento como se apresentam, sem a necessidade de linearização das mesmas.

Ainda em relação aos modelos matemáticos para simular o escoamento em rios Tucci (2014) considera o modelo Muskingum desenvolvido por McCarthy em 1939, como sendo o modelo mais usual, é um modelo do tipo armazenamento, baseado na equação da continuidade a qual pondera o efeito da vazão de entrada e saída do sistema, e é um modelo concentrado no espaço, pois considera que ocorrem relações entre a vazão o armazenamento e o nível ao longo do trecho simulado.

Outro grupo de modelos importantes que vêm sendo desenvolvidos ao longo de décadas são os ditos modelos Chuva-Vazão, ou Precipitação-Vazão. Estes modelos buscam representar o ciclo hidrológico pelos fenômenos que ocorrem entre a precipitação e a vazão, considerando desde os processos atmosféricos a partir do momento da precipitação como a interceptação e evapotranspiração, como toda a sequências de estágios que ocorrem no processo de interação com a biosfera e escoamento, infiltração e fluxos através de superfícies vertentes, fluxos através do solo, de reservatórios naturais rios e canais (Tucci, 2005).

Segundo Tucci (2005), os modelos chuva-vazão apresentam estruturas bem definidas baseadas no método de discretização da bacia: concentrados, distribuídos por sub-bacias ou modulares, a exemplo das *Hydrological Response Units* (HRU's). Ainda necessitam de bases de dados que forneçam variáveis hidroclimáticas. Necessitam ou apresentam estruturas de integração de processos distinguindo os processos ocorrentes na bacia entre processos superficiais e subterrâneos, processos de escoamento em superfícies ou em canais, etc. Todas estas estruturas dos modelos chuva-vazão foram beneficiadas por um significativo progresso baseado na evolução dos algoritmos computacionais, equipamentos e softwares. Hoje a aquisição, consolidação, integração e compilação destes dados é possível de ser facilmente realizada a partir de plataforma de geoprocessamentos como o QGIS e o ARCGIS, favorecendo o e agilizando o processo de modelagem hidrológica.

Os modelos são então abstrações projetadas sob um rigor científico com a finalidade de facilitar a observação, a análise, a simulação de processos e a obtenção de dados e informações acerca de estruturas e fenômenos complexos relativos ao ambiente real. Em seu trabalho, “Modelos matemáticos e o entendimento da estratégia de desenvolvimento dos ecossistemas”, Angelini (2017), diz que os modelos em geral simplificam a realidade e os modelos matemáticos simplificam a matemática representativa da realidade. Partindo deste ponto, e tomando o modelo malthusiano de crescimento populacional como base argumentativa, discorre acerca da tipologia e da conceituação de modelos ecossistêmicos, e de como o modelo tornar-se-á mais complexo e próximo da realidade quanto maior sejam as incorporações de parâmetros e equações. Para Angelini (2017), existem dois tipos de modelos: os Tróficos que modelam o ecossistema em relação aos processos bióticos de produção, consumo, fluxo e ciclagem de nutrientes entre os níveis tróficos; e os de Engenharia que modelam os ciclos biogeoquímicos, os processos físicoquímicos, as alterações no uso e cobertura do solo, e os processos hidrológicos.

Segundo Porto *et al.* (2002) o modelo é uma simplificação de um sistema real a ser analisado, porém como as situações reais são geralmente muito complexas, a realidade foi limitada aos elementos relacionados aos problemas para os quais se busca uma solução. O modelo nada mais é que uma abstração ou representação de um objeto (parte de algo ou o todo) ou de um sistema de maneira que seja possível e mais fácil o seu estudo e a compreensão de suas respostas as diferentes entradas (Tucci, 2005). Uma bacia hidrográfica é um sistema complexo onde o homem necessita monitorar o seu comportamento para poder prever as respostas a diferentes eventos como precipitações extremas, mudanças no uso da terra, secas, entre outros. O modelo hidrológico é uma das tantas ferramentas desenvolvidas para poder representar o comportamento hidrológico de uma bacia, a fim de poder entender as suas respostas a diferentes condições observadas. Logo o modelo não é um objetivo científico, mas um recurso para favorecer o estudo e atingir um objetivo (Tucci, 2005).

Segundo Vigiak *et al.*, (2018), em uma bacia, as condições ecológicas dos cursos d'água são avaliadas com base no regime de vazões, morfologia, qualidade da água e biota, estes dados são variáveis e parâmetros para o manejo sustentável da bacia hidrográfica, e são obtidos com base no regime de vazões e suas alterações. Logo, a avaliação do estado ecológico é inferida a partir da alteração da vazão natural, sob o raciocínio de que um ecossistema aquático adaptado a um regime de vazões específico sofre um elevado stress quando as pressões humanas ou outras provocam alterações no seu regime de vazões. Frequentemente são utilizados Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH's) estes indicadores medem as variáveis que

configuram o estado ecológico da bacia, e geralmente estas variáveis são obtidas por meio de modelos hidrológicos (Vigiak, Lutz, *et al.*, 2018). Os modelos hidrológicos favorecem a gestão pois permitem avaliar as condições do regime de vazões, o regime natural e quantificar o desvio das condições atuais. Os modelos hidrológicos podem ser aplicados para muitas situações nas quais são necessárias respostas rápidas, com boa acurácia e precisão, a baixo custo e de fácil obtenção.

Um exemplo da aplicação de modelos ao estudo dos recursos hídricos, mas não diretamente relacionado a simulações dos processos de escoamento foi descrito por Lafayette *et al.* (2019) onde foi utilizado o *Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model* (SiSPAT) para avaliar a evaporação de água do solo, por meio da transferência de massa para a atmosfera, utilizando como equipamento de medição uma Câmara Portátil (CP). O estudo foi realizado no povoado Mutuca, município de Pesqueira, semiárido do Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. Os resultados da modelagem com o SiSPAT geraram dados proveitosos sobre a evaporação da água do solo em diferentes condições da profundidade do lençol freático, onde foram obtidas taxas de evaporação de 1,43% e 4,44% com condições de profundidade do lençol freático entre 0,20 e 1,20m.

Ao tratar da simulação do escoamento superficial o modelo da Curva Número (CN) é quase sempre considerado por seu valor histórico, respaldo e eficiência. Este modelo foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo do USDA (SCS), hoje Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NCRS), na década de 1950, trata-se de um modelo empírico que relaciona a precipitação ao escoamento superficial. O método considera condições de cobertura do solo, condições de superfície, classe do solo, manejo e uso do solo, entre outros. É capaz de simular o escoamento superficial; caracterizar o escoamento de acordo com a precipitação ocorrente; e possibilita a obtenção das taxas de infiltração e umidade no solo. O método da CN foi utilizado para a estimativa das condições iniciais de contorno necessária para modelagem da bacia do rio Guariroba, município Campo Grande, Mato Grosso do Sul, porém o experimento não obteve sucesso, pois valores apontados pelos indicadores de eficiência Nash-Sutcliffe e Percent BIAS não corroboraram a validação da modelagem (Valle Jr. *et al.*, 2019).

Um exemplo de aplicação da modelagem computacional de uma bacia hidrográfica com a finalidade de simular a produção de sedimentos foi proposto por Fagundes *et al.* (2019) que realizou a calibração automática do modelo MGB-SED para a bacia do Rio Doce em Minas Gerais, utilizando o algoritmo de otimização MOCOM-UA, considerando dados de 108 estações, instaladas na bacia abrangendo o período de 1997 e 2010. Os resultados foram 37 ciclos de calibrações seguidos de 111 testes de validação. Os resultados demonstraram que

quanto mais dados de concentração de sedimentos em suspensão disponíveis na estação, melhor a qualidade da calibração. Fato demonstrado pelo coeficiente de ENS de -0,44 para 0,44.

Em seu estudo Teklay *et al.* (2019) utilizou o modelo hidrológico e a análise estatística do Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para avaliar os impactos da alteração de uso da terra nas respostas hidrológicas na bacia do Rio Gumara, afluente do lago Tana na Etiópia. Foram avaliadas duas configurações do modelo que simularam cenários distintos de utilização da terra, sendo elas: uso estático da terra (UET) e uso dinâmico da terra (UDT). As saídas para ambas as condições foram posteriormente comparadas, e as diferenças entre si processadas estatisticamente e resultaram na amplitude do impacto. As variáveis objetivo da simulação foram o escoamento superficial, evapotranspiração e a vazão de pico. Os resultados encontrados evidenciaram que a comparação entre cenários distintos possibilitou observar o melhor ajuste do SWAT para o caso específico do Rio Gumara (Teklay, Dile, *et al.*, 2019).

Viraes e Cirilo (2019) investigaram métodos para regionalização de parâmetros hidrológicos para o semiárido brasileiro em função da escassez de dados. Para tanto, selecionaram o território dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. No estudo optaram por utilizar o MODHAC - Modelo Hidrológico Autocalibrável. Inventariaram 45 estações fluviométricas com no mínimo 8 anos de dados contínuos, que foram consistidos tomando por base os anos 2000. Conseguiram obter NSE de 63% sendo considerada uma modelagem satisfatória.

No processo de gestão de águas, devem ser usadas diversas ferramentas que permitam avaliar e quantificar as demandas reais e potenciais, e com esse objetivo podem ser utilizados desde o sensoriamento remoto, para monitoramento do uso da terra, quanto modelos para simulações e projeções hidrológicas. Assim, diante da necessidade de gerenciar a alocação de água nas bacias mediterrâneas do sul da Europa, para os diversos usos, sem comprometer o maior demandante, neste caso a agricultura, Rivas-Tabares *et al.* (2019) utilizaram o modelo SWAT como ferramenta para suporte a gestão. Objetivando avaliar o balanço hídrico da Cega-Eresma-Adaja (CEA), pois esta bacia mediterrânea situada no sul europeu enfrenta graves problemas de disponibilidade hídrica em função da demanda crescente de água para irrigação, e para atendimento do abastecimento da população.

Os resultados apontam que o SWAT é um modelo capaz de fornecer dados importantes para a gestão. Os mapas de uso da terra fornecem os dados mais importantes para a etapa de definição das unidades de respostas hidrológicas, logo qualquer esforço no sentido de obter mapas mais precisos possibilitará melhores resultados das simulações. Os resultados das simulações foram muito próximos aos valores observados. Os reservatórios são eficazes

para a manutenção das vazões em níveis adequados a preservação dos corpos hídricos, porém o maior esforço deve ser no sentido da conservação do solo, em função de sua importância na disponibilidade hídrica para a vegetação e por consequência para a recarga dos aquíferos. Por este motivo um aumento na cobertura com vegetação em áreas de pousio e encostas com declividade acima de 5% contribuiriam para a redução do escoamento aumentando a taxa de infiltração, com isto um incremento do fluxo hídrico subterrâneo (Rivas-Tabares, Tarquis, *et al.*, 2019).

Segundo Nilawar e Waikar (2019) na modelagem ambiental de recursos hídricos, a obtenção resultados precisos de simulações de vazões e concentração de sedimentos, bem como as variações climáticas que influenciam nestes processos, constituem problemas de significativa importância científica. Para estudar a influência climática na dinâmica hidrológica e sedimentar, utilizaram Modelos Climáticos de Circulação Regional (MCCR) acoplados ao modelo SWAT. Os estudos foram realizados considerando cenários climáticos projetados em escala linear para a bacia do rio Purna na Índia, para os períodos: P1 (2009 a 2031), P2 (2032 a 2053), P3 (2054 a 2075) e P4 (2076 a 2099). Dentre as projeções climáticas selecionadas, o cenário mais extremo evidenciou que a temperatura média da bacia tende a elevar-se de 0,52 a 1,32 ° C, influenciando em uma elevação da precipitação média no intervalo de 4,90 a 10,61%. Também foi possível verificar o aumento na vazão e na concentração de sedimentos durante os períodos chuvosos além de identificar que 50% da concentração de sedimentos é resultante da erosão marginal e contribuições dos pequenos afluentes da bacia para o curso principal. Por fim as simulações demonstraram a possibilidade de utilização do SWAT para análises temporais dos efeitos das alterações climáticas para a bacia do Rio Purna, Índia (Nilawar, Waikar, 2019).

O SWAT também já foi testado acoplado a algoritmos e códigos de máquinas otimizáveis para estimativa da Vazão Máxima Instantânea (VMI) e a Vazão Máxima Diária Média (VMDM). O objetivo da utilização dos códigos de otimização foi simular vazões com intervalos menores que os diários e otimizar os resultados diários médios das simulações, melhorando a qualidade das respostas do modelo. A finalidade do estudo foi possibilitar a utilização do modelo SWAT em conjunto com uma rotina de inteligência artificial para prever vazões máximas e avaliar os riscos de inundação de uma dada região em uma bacia. Para tanto, foram testados o desempenho dos seguintes algoritmos e sistemas acoplados no SWAT: Redes Neurais Artificiais (RNA); Sistema de Inferência Adaptativo Neuro-difuso (SIAN); Máquina com Suporte Vetorial (MSV), Máquina de Aprendizagem Extrema (MAE) (Senent *et al.*, 2018).

No estudo apresentado, pesquisadores demonstraram que o SWAT possui uma boa capacidade de simulação da vazão média diária com um Nash-Sutcliffe modificada de 0,64, o

que é considerado aceitável, e um índice de concordância 0,95, considerado um bom resultado. Na simulação de vazões máximas instantâneas (VMI) todos os algoritmos apresentaram possibilidade de utilização, porém a MAE obteve o melhor desempenho, com um erro quadrático médio de 48,59 e coeficiente de determinação de 0,86. No geral o estudo demonstrou que a estratégia de utilização do SWAT com algoritmos de otimização possibilita a simulação de fenômenos extremos em bacias com pouca disponibilidade de dados, possibilitando o seu uso para avaliação de tendências de inundação e predição da VMI (Senent *et al.*, 2018).

Buscando entender como as mudanças climáticas influenciam nos processos hidrológicos, e afetam a temperatura dos corpos hídricos, seus processos químicos e bioquímicos e na manutenção vida em meio aquático na bacia do Rio Athabasca (ARB), Du, Shrestha e Wang (2019) estudaram rotinas de simulação envolvendo o acoplamento de modelos climáticos empíricos, baseados em regressões estatísticas, ao modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Assim além de simular os efeitos das condições meteorológicas, o modelo modificado é capaz de simular os processos hidrológicos, tais como: escoamento superficial, escoamento subterrâneo, e o escoamento de neve derretida, qualidade da água. Com este estudo foi possível investigar os potenciais impactos das alterações climáticas e hidrológicas sobre a qualidade da água no ARB, causados pelas mudanças de temperatura do curso d'água. Os resultados apontaram para uma progressiva elevação da temperatura do ARB, com valores projetados acima da média, essa elevação poderá alterar os ciclos bioquímicos do rio, bem como representa uma ameaça a algumas espécies de peixes (Du *et al.*, 2019).

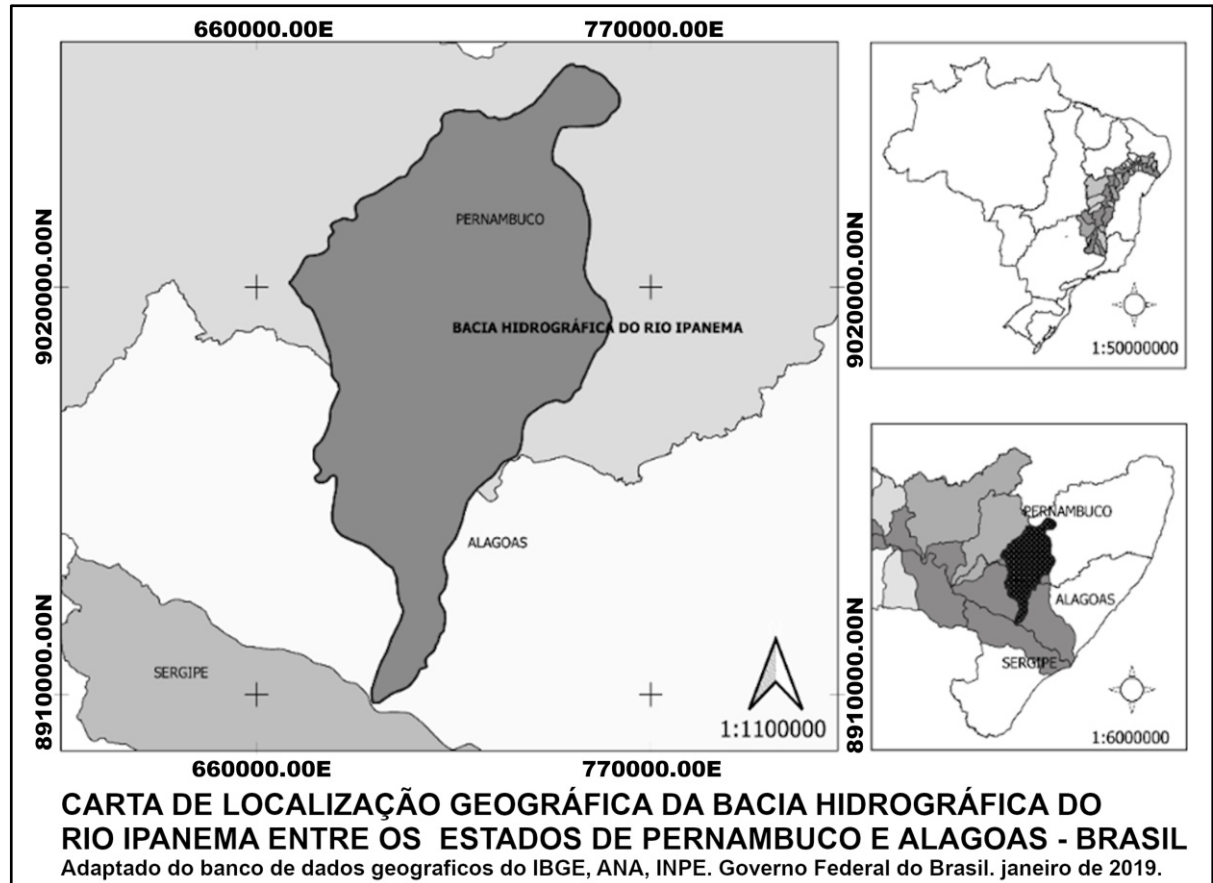
No processamento de dados para modelagem hidrológica, a Evapotranspiração (ET) é uma variável de extrema importância pois integra no balanço hídrico a parcela de água que ascende para a atmosfera, e implica em perdas de água no solo, por meio dos fenômenos de evaporação da água e transpiração das plantas, logo esta variável também é muito importante para o manejo agrícola. Assim Chun *et al.* (2018) em seu estudo avaliaram métodos para estimativas da ET utilizando modelo SWAT, e comparando as saídas do SWAT à outras três metodologias: método do balanço hídrico, estimativas de ET baseadas em análises de imagens de satélite (utiliza índices de vegetação) e o método de Relacionamento Complementar Generalizado (RCG). Nas simulações, o RCG superestimou as taxas anuais de ET comparado com o balanço realizado entre as diferenças das precipitações anuais e as vazões médias anuais. Os resultados das simulações anuais de ET baseadas nos resultados mensais simulados pelo SWAT apresentam maior confiabilidade, porém os pesquisadores recomendam um aprofundamento dos estudos envolvendo o SWAT em regiões semiáridas (Chun *et al.*, 2018).

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPANEMA (BHRI)

Foi realizada a caracterização geográfica do território da bacia do Rio Ipanema. Na Figura 1 é apresentada a localização e o posicionamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema (BHRI). Segundo Coelho *et al.* (2017), a BHRI está inserida no Polígono das Secas, e sofre fortes pressões socioambientais em função das demandas hídrica locais versus os longos períodos de seca. A BHRI integra o conjunto de bacias afluentes da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF). Devido as características climáticas e ambientais da região onde se insere bem como a sua importância hidrológica e social a BHRI é uma bacia onde vêm se desenvolvendo vários estudos e pesquisas realizadas por universidades regionais que compõem a Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA).

Figura 1 - Carta de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema - BHRI.



Fonte: Própria autoria, 2019.

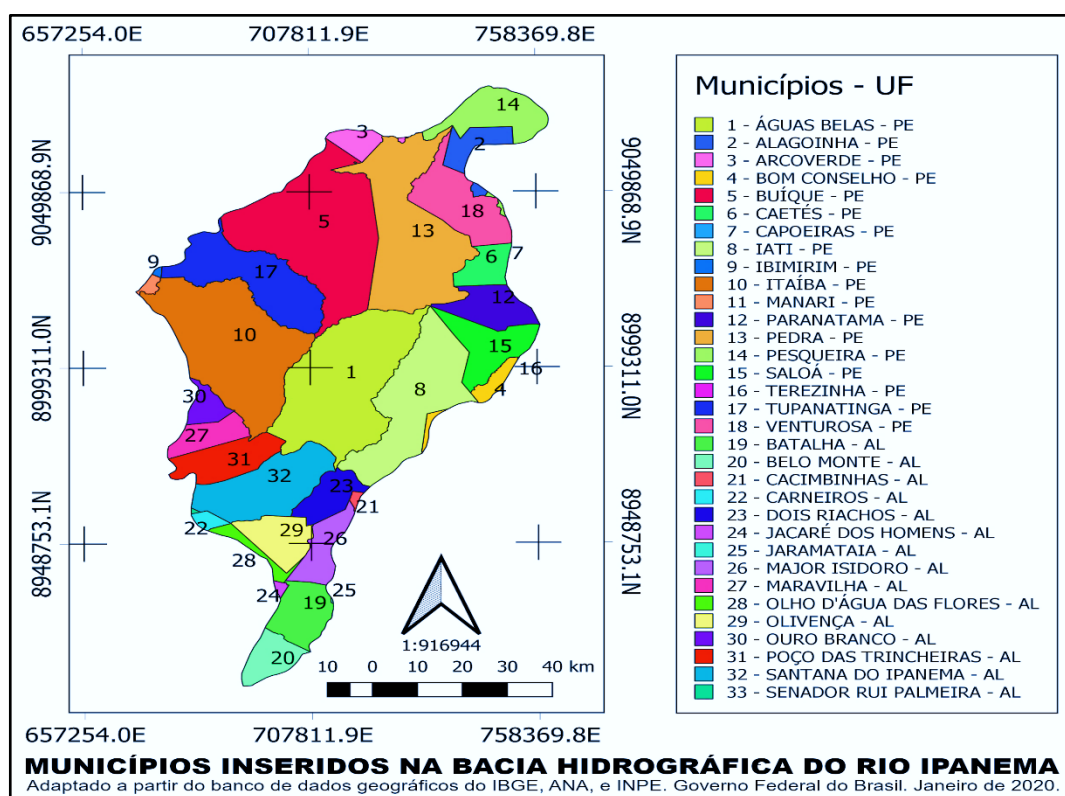
A nascente do Rio Ipanema encontra-se no território de Pesqueira-PE, a uma altitude de aproximadamente 1.000 m. Em seu trajeto o Rio Ipanema corta parte dos Estados de Pernambuco e Alagoas desaguando na margem esquerda do rio São Francisco (Sousa, Viana, *et al.*, 2018). A bacia possui área de aproximadamente 7.650 km², e comprimento axial de aproximadamente 180 km, mensurados a partir das projeções vetoriais da bacia no Datum SIRGAS 2000 e sistema de posicionamento UTM, zona 24S disponíveis na base de dados geográficos da Agência Nacional de Águas (ANA). As respectivas coordenadas UTM estão disponíveis na Tabela 1. A área integral da bacia constitui um divisor de águas federal, pois se estende entre os territórios dos Estados de Alagoas e Pernambuco, aqui designado pela sigla ALPE.

Tabela 1 - Coordenadas UTM dos limites extremos da bacia.

	Zona	Montante	Jusante	Limite extremo leste	Limite extremo oeste
Latitude UTM	24S	9079779.02	8907069.42	9009659.15	9020708.46
Longitude UTM	24S	755397.04	692355.19	759505.95	668975.86

Ao todo 33 municípios estão inteiros ou parcialmente inseridos na área da BHRI, e são drenados pelo Rio Ipanema no território dos ALPE (Figura 2).

Figura 2 - Recorte político dos municípios dos ALPE inseridos na BHRI.

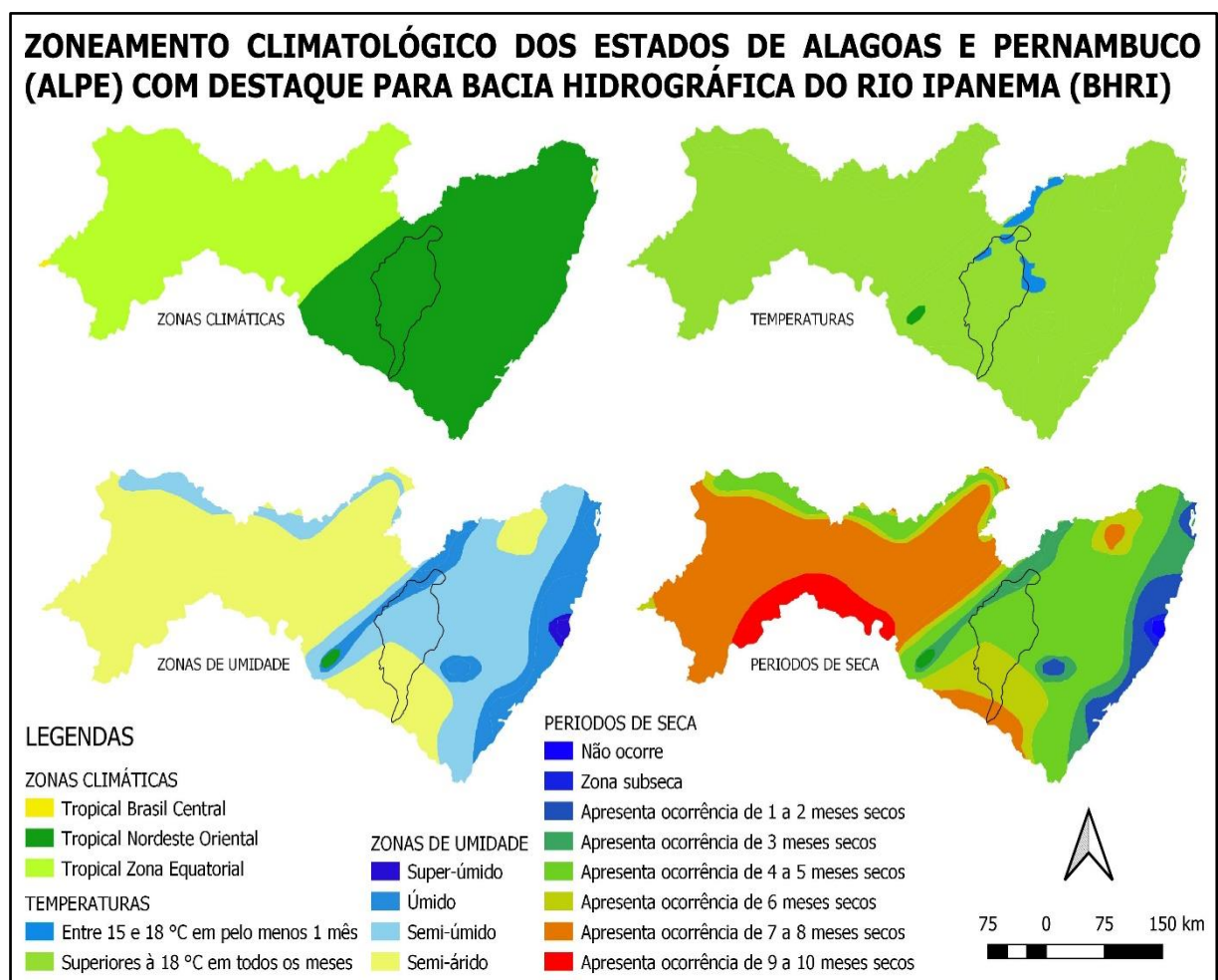


Fonte: Própria autoria, 2019.

A BHRI está inserida no semiárido, possui solos rasos, com afloramento rochoso, e poucas fontes de recursos hídricos. A região a qual a BHRI pertence está caracterizada como área de aquífero fraturado do semiárido, isso significa que a água que se armazena nestas áreas, na maior parte é água de fratura de rocha, normalmente são águas que apresentam potencial de salinidade elevado a depender da formação geoquímica do reservatório rochoso.

Segundo Couto *et al.* (1996) in Silva *et al.* (2013) mais de 50% das propriedades rurais com agricultura de base familiar estão localizados no nordeste brasileiro. Cerca de 2,0 milhões de propriedades responsáveis por aproximadamente 33% da produção agrícola regional, custeados por menos de 8% do total de financiamentos públicos e privados no Brasil e ocupando menos de 31% da área total disponível para agricultura no Nordeste.

Figura 3 - Zoneamento climatológico de Alagoas e Pernambuco com destaque para a BHRI.



Fonte: Própria autoria, 2019.

O desenvolvimento da agricultura na região torna-se uma tarefa complexa, pois é muito difícil fazer agricultura sem dados e sem planejamento no semiárido. Silva *et al.* (2013)

diz que conhecer o regime de chuvas do semiárido nordestino brasileiro é de fundamental importância para gestão de recursos hídricos e para a tomada de decisões relacionadas ao desenvolvimento da agricultura. E em função disto o monitoramento hidrológico possibilita a obtenção de informações que subsidiam o planejamento dos recursos hídricos, o uso e ocupação do solo, o calendário de produção agrícola, o aporte de capital entre outros.

A agricultura é desenvolvida nos vales aluviais pois, encontram-se nestes locais, áreas mais apropriadas ao desenvolvimento dos cultivos, principalmente a pequena agricultura, ou agricultura de subsistência (Coelho *et al.*, 2017). Segundo Sousa *et al.* (2018), o clima é considerado muito quente com temperaturas médias anuais que ultrapassam os 23°C. A distribuição das chuvas no espaço e no tempo é irregular. As precipitações se concentram entre os meses de março a maio, e possui média anual abaixo dos 700 mm. A evapotranspiração potencial é muito elevada, e ultrapassa os 1.600 mm.ano⁻¹.

Conforme demonstrado na Figura 3 (supra), elaborada partir do banco de dados geográfico do IBGE para o ano de 2014, a bacia do Rio Ipanema está completamente inserida na zona climática Tropical Nordeste Oriental, com temperaturas que oscilam de 15 °C a níveis superiores aos 18 °C em boa parte do ano o que corrobora com a caracterização climática de Sousa *et al.* (2018). A BHRI ocupa uma extensão de área que abarca três zonas de umidade, - úmido, semi-úmido e semi-árido, além disso passa de 3 a 8 meses em seca.

3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT)

O SWAT é extensamente descrito e detalhado em sua documentação técnica, que será base para uma exploração condensada do modelo neste tópico. O SWAT foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold, do Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS). Foi desenvolvido para simular bacias hidrográficas, prognosticar o impacto sobre os recursos hídricos resultantes das práticas de manejo da terra, da produção de sedimentos e da aplicação de produtos químicos em plantações. Utiliza como parâmetros o tipo de solo, uso da terra, e os aspectos da gestão, para longos períodos de tempo (Neitsch *et al.*, 2009).

O modelo SWAT começou a ser desenvolvido na década de noventa, incorporando várias tecnologias de software já existentes, buscando unificar aplicações que rodavam de forma isoladas e limitadas em uma grande plataforma multiferramental que possibilitasse ganho de desempenho e capacidade de processamento (Gassman *et al.*, 2007). Os primeiros módulos do SWAT foram *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) que por sua vez

resulta da junção de outros famosos modelos da *United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service* (USDA-ARS), a exemplo *Chemicals, Runoff and Erosion from Agriculture Management Systems* (CREAMS), *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* (GLEAMS), e o *Environmental Impact Policy Climate* (EPIC). O SWAT consolida e quase 40 anos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias em softwares e modelagem computacional e matemática aplicada a ciência ambiental, aos recursos hídricos e a Agricultura (Neitsch *et al.*, 2005).

É um modelo baseado em fenômenos físicos e características naturais. Processa dados e informações sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo do solo, movimentação hídrica, movimentação sedimentar, crescimento da colheita, ciclo de nutrientes, etc. Assim permite determinar o impacto das variáveis supracitadas sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos (Neitsch *et al.*, 2009).

O SWAT admite dados de entrada resultantes de estudos realizados por entidades governamentais, facilitando a aquisição de dados. É aplicável à simulação de grandes e pequenas bacias hidrográficas com baixo custo e sem dispêndio elevado de tempo. Possui alto desempenho computacional, o que favorece a simulação de longo prazo. A simulação de longo prazo permite analisar fenômenos de acumulação gradual dos poluentes e seus impactos nos corpos d'água. É um modelo de tempo contínuo, com longo prazo de produção implementado para simular uma vasta gama de questões relacionadas aos recursos hídricos (Arnold *et al.*, 2012).

O modelo SWAT permite que diferentes processos físicos possam ser simulados em uma bacia hidrográfica. Para tanto, o modelo subdivide a bacia hidrográfica em várias sub-bacias e microbacias. A discretização da área de uma grande bacia em sub-bacias favorece a simulação pois permite restringir a área de simulação considerando características específicas de cada sub-bacia como uso da terra, tipo de solo, propriedades diferentes para cada tipo de solo; estas são características que podem causar impactos na hidrologia da bacia (Arnold *et al.*, 2012).

A discretização permite realizar análises específicas para cada sub-bacia ou grupos de sub-bacias de maneira distinta, observar por exemplo a contribuição de um dado grupo de terras para o aporte de sedimentos ou mesmo a contribuição de por volume de água, isolar áreas com aquíferos, entre outros. Cada sub-bacia pode ser agrupada nas seguintes categorias: clima; unidade de resposta hidrológica (HRU's); açudes/pântanos; águas subterrâneas; e canal principal, ou extensão. As HRU's áreas discretizadas contendo um único tipo de cobertura ou uso da terra, e de solo, onde se combinam vários tipos de manejo e gestão (Neitsch *et al.*, 2009).

Enfim a modelagem com o SWAT parte do princípio da observação intrínseca do que ocorre na bacia e influencia diretamente no balanço hídrico da bacia. O SWAT opera basicamente em duas fases de simulação: fase do terreno, e a fase do ciclo hidrológico.

3.2.1 Fase do terreno

3.2.1.1 Equação do equilíbrio

O ciclo hidrológico, simulado pelo SWAT, baseia-se na equação do equilíbrio hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

SW_t : é a quantidade final de água no solo (mm H₂O);

SW_0 : é a umidade do solo inicial no dia i (mm H₂O);

t : é o tempo (dias);

R_{day} : é a quantidade de precipitação no dia i (mm H₂O);

Q_{surf} : é a quantidade de área de escoamento superficial no dia i (mm H₂O);

E_a : é a quantidade de evapotranspiração no dia i (mm H₂O);

W_{seep} : é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i (mm H₂O); e

Q_{gw} : é a quantidade de retorno do fluxo no dia i (mm H₂O).

A discretização em sub-bacias possibilita a análise dos parâmetros como a evapotranspiração para diferentes cultivos e usos da terra. O escoamento é processado nas HRU's e os resultados das unidades hidrológicas são contabilizados para a obtenção da produção total da bacia hidrográfica, desta forma o processamento consegue representar melhor o equilíbrio hidrológico (Arnold *et al.*, 2012).

A fase do terreno no processo de modelagem é influenciada por um conjunto de outros parâmetros e/ou fenômenos que impactam diretamente sobre o balanço hídrico nas HRU's: Clima; Hidrologia; Cobertura do Terreno e Crescimento Vegetal; Processos de Erosão; Ciclo de Nutrientes; Ciclos dos Pesticidas; e por fim Gerenciamento (manejo) da bacia (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.1.2 Clima

Este componente é responsável por prover os dados de umidade e energia interferentes no equilíbrio hídrico e pelo potencial de impacto de cada componente do ciclo hidrológico. No SWAT as variáveis climáticas são a precipitação diária, a temperatura máxima/mínima do ar, a radiação solar, a velocidade do vento e a umidade relativa. O modelo permite o uso dos dados referentes as variáveis supracitadas que tenham sido observados na bacia, ou gerados durante a simulação, para tal feito, conta com algoritmos geradores de dados de clima implementados em seu código (Neitsch *et al.*, 2009).

3.2.1.3 Hidrologia

Quando as chuvas caem podem ser interceptadas e retidas nas árvores/plantas ou, cair na diretamente superfície do solo. A água infiltrará pela superfície até o perfil mais baixo do solo ou, descerá por terra como escoamento. O escoamento se movimenta relativamente rápido na direção do canal e contribui para uma resposta do curso de água em curto prazo. A água infiltrada pode ser retida no solo e depois evapotranspirar ou, pode lentamente caminhar para o esgoto por caminhos subterrâneos (Neitsch *et al.*, 2009; Tucci, 2014).

Além disso a água precipitada em forma de chuva pode ser interceptada pelo dossel das árvores onde pode ser retida e sofrer evaporação ou escorrer até o solo através das folhas, galhos e caule das plantas reprecipitando (Neitsch *et al.*, 2009; Tucci, 2014). Esta parcela da água precipitada e inicialmente retida é computada pelo método da Curva Número (CN) ou pelo Método de Green & Ampt, que fazem parte do balanço de infiltração e escoamento superficial na modelagem com SWAT. A quantidade de água envolvida neste processo está diretamente vinculada ao índice de cobertura vegetal da terra e o índice de área foliar (Arnold *et al.*, 2011).

Após passar pela cobertura vegetal a água que consegue atingir o solo vai sofrer outras interferências em seu trajeto, a infiltração é um desses estágios de interferência, onde a água penetra no perfil do solo a partir da superfície na interface terra-atmosfera. A taxa de infiltração da água no perfil do solo está diretamente relacionada com o grau de saturação do solo, ou índice de umidade. Conforme o solo é saturado a taxa de infiltração diminui e o fenômeno do escoamento superficial se inicia (Neitsch *et al.*, 2009; Tucci, 2014).

Após o primeiro estágio de infiltração as camadas superiores do solo ficam saturadas, e se inicia um pequeno escoamento superficial, com o passar do tempo aquela água

que iniciou o seu processo de infiltração vai se redistribuindo no sentido vertical em direção as camadas mais profundas do solo, esta redistribuição é a movimentação contínua da água através do perfil do solo, ela permanece após cessar a entrada de água pela superfície; é influenciada pela umidade do solo; e tende à estabilizar-se (Arnold *et al.*, 2012; Tucci, 2014). O SWAT modela esta redistribuição utilizando o método de rota de armazenamento, considerando cada camada de solo e a zona de raiz das plantas, a percolação ocorre de maneira descendente e é influenciada pela condutividade e pela temperatura do solo (Arnold *et al.*, 2011).

A evapotranspiração, de maneira geral, abrange todos os processos físicos e biológicos a partir dos quais a água na superfície terrestre é convertida em vapor. O SWAT processa a evaporação e a transpiração de forma separada considerando o solo e a vegetação. A evaporação potencial da água no solo é obtida em função da evapotranspiração potencial, do índice de área foliar equivalentes e da área da HRU. A evaporação real é calculada através de modelos de profundidade do solo e disponibilidade hídrica (Arnold *et al.*, 2011).

A evapotranspiração da planta é o produto da evaporação, da transpiração e do índice de área foliar. A evapotranspiração potencial é a taxa de evapotranspiração que poderia ocorrer em condições ideais de suprimento hídrico e cobertura vegetal, e não é afetada por processos microclimáticos. O SWAT utiliza três modelos para esta simulação: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith (FAO-56) (Neitsch *et al.*, 2009).

As contribuições laterais subsuperficiais ou subterrâneas são originadas abaixo da superfície, a partir das zonas saturadas, são calculados em conjunto com a redistribuição ao longo do perfil do solo. O escoamento superficial ou fluxo por via terrestre, é o fluxo que ocorre ao longo de uma superfície inclinada, o modelo SWAT simula o volume do escoamento superficial e as taxas máximas de escoamento superficial para cada HRU (Neitsch *et al.*, 2009).

No SWAT o volume do escoamento superficial é computado pelo método da Curva Número (CN), utilizado pelo Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, lançado no ano de 1983 (SCS/USDA83), ou pelo método de infiltração de Green & Ampt. No método da CN quando o solo se aproxima da saturação inicia-se o processo de escoamento. Pelo método de Green & Ampt a água que não infiltrar se torna um escoamento superficial. As taxas máximas de escoamento são calculadas pelo método racional modificado. O tempo de concentração é calculado pelo método de Manning. O SWAT também permite a simulação de estruturas de acumulação como lagoas de água localizadas dentro da sub-bacia, que interceptam o escoamento superficial e influenciam amortecendo as ondas de cheia (Arnold *et al.*, 2011).

O modelo subdivide o sistema de drenagem da sub-bacia em dois tipos de canais: canal principal e os canais afluentes. Os canais afluentes são menores e conduzem uma parte da água pertencente à sub-bacia, e não sofrem intervenção subterrâneas em seu fluxo (ex.: linhas d'água, córregos, riachos, etc.). O Canal principal recebe o fluxo dos canais afluentes, também é o ponto inicial para o mapeamento da sub-bacia. É a partir das características dos canais afluentes que é determinado o tempo de concentração da sub-bacia no SWAT (Neitsch *et al.*, 2009).

As perdas de condução são perdas de escoamento na superfície até o leito do rio, ocorrem em córregos efêmeros ou intermitentes, com pouca contribuição do aporte subterrâneo. O modelo SWAT usa o método de Lane do SCS/USDA83 para estimar as perdas de condução. As perdas de água no canal é um produto da largura, do comprimento e da velocidade do fluxo. Os ajustes de condução e taxa de condução são realizados nos canais afluentes (Williams *et al.*, 2011).

O fluxo de base é o fluxo de água subterrânea que contribui para as vazões na calha dos canais, também chamado de vazão de retorno. No SWAT as águas subterrâneas são classificadas: o aquífero raso não confinado; e o aquífero profundo confinado. As águas que percolam além da zona de raízes, alimentam ambos os tipos de aquíferos. O aquífero raso alimenta o fluxo de base e atua na manutenção da umidade do solo e pode ser absorvida pelas plantas, ambos os aquíferos podem ser explorados por bombeio (Neitsch *et al.*, 2009).

3.2.1.4 Cobertura do terreno/crescimento vegetal

No SWAT um único modelo de crescimento vegetal é utilizado para simular os diversos tipos de coberturas vegetal. O modelo de crescimento avalia o consumo hídrico, de nutrientes, a taxa de transpiração e a produção de biomassa. O aumento potencial na biomassa é função da energia interceptada e da conversão de energia em matéria, e relaciona com capacidade de realizar fotossíntese, considerando a captação de radiação solar e índice de área foliar. Para o seu desenvolvimento a planta demanda por alguns nutrientes obtidos a partir do solo, por exemplo, o nitrogênio e o fósforo. O modelo calcula a necessidade de fornecimento a partir da diferença entre a concentração real e ideal na planta, e estes variam de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta. Como o crescimento e produção da planta sofre forte influência do meio ambiente, o modelo estima os efeitos da água, dos nutrientes e da temperatura (Arnold *et al.*, 2011).

3.2.1.5 Erosão

Para calcular a erosão e a produção de sedimentos na HRU o SWAT utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE). A MUSLE utiliza a quantidade de escoamento para computar erosão e a produção de sedimento. O SWAT simula a energia de erosão, a partir do volume escoado, da taxa de escoamento e da velocidade de escoamento. O modelo hidrológico realiza estimativas de volume de escoamento e taxa de escoamento máximo que, com a área da sub-bacia, são usadas para calcular a variável de energia erosiva de escoamento (Williams *et al.*, 2011).

3.2.1.6 Nutrientes

O modelo SWAT processa os ciclos de nutrientes nas HRU's, consegue simular a movimentação e a transformação de várias formas de nutrientes na bacia hidrográfica. Cada nutriente se processa no solo conforme seus ciclos biogeoquímicos e podem ser levados ao canal principal e transportados à jusante por meio do escoamento superficial e pelas contribuições laterais (Neitsch *et al.*, 2009).

3.2.1.7 Pesticidas

O modelo SWAT permite estudar o comportamento dos pesticidas aplicados em uma HRU, bem como estudar o movimento destas substâncias químicas no âmbito da bacia hidrográfica. Este movimento se dá em função da solubilidade, da degradação, do tempo de vida e do coeficiente de absorção de carbono orgânico do solo. Enquanto que o pesticida residual da folhagem e do solo sofre degradação exponencialmente em função do tempo de vida. O transporte é realizado pela água e através do sedimento. O transporte é calculado em evento de escoamento e a lixiviação em cada camada de solo quando há percolação (Neitsch *et al.*, 2009).

3.2.1.8 Gerenciamento (manejo)

O modelo SWAT permite a configuração de diferentes práticas de manejo em todas as HRU's. O usuário pode definir o início e o fim do cultivo, o prazo e quantidade de fertilizante,

a quantidade de pesticida, a irrigação, o plantio de pastagem, usar fertilização automatizada, etc. O modelo SWAT possibilita a configuração de sistemas de rotação do cultivo e de diferentes colheitas. A rotação de cultura no modelo SWAT implica em uma mudança de práticas de gerenciamento de um ano para o outro (Arnold *et al.*, 2012).

O modelo não limita a duração dos diversos ciclos de rotação, também não limita as dimensões das áreas cultiváveis, de uso da terra na HRU, porém somente é possível simular um tipo de uso da terra por vez. Por fim, o modelo SWAT permite a simulação dos tipos de utilização da água, seja para abastecimento ou para utilização em projetos de irrigação, por exemplo. Permite simulações com água da própria HRU, com água fornecida de outras HRU's, e mesmo a simulação de transposições ou transferências entre reservatórios, trechos e sub-bacias (Arnold *et al.*, 2012).

3.2.2 Fase do ciclo hidrológico

Segundo Neitsch *et al.* (2009) o SWAT consegue simular os acúmulos de água, sedimento, nutrientes e pesticidas no sentido do curso d'água principal, estes acúmulos são direcionados por meio da drenagem da bacia hidrográfica. Para monitorar o fluxo em massa no canal, o SWAT também consegue modelar as transformações químicas nos corpos hídricos.

3.2.2.1 Propagação no canal principal ou extensão

Este processo pode ser dividido em quatro componentes: propagação de cheias; propagação de sedimentos; propagação de nutrientes; e propagação de químicos orgânicos (NEITSCH, ARNOLD, *et al.*, 2009). Na sequência estes componentes são brevemente detalhados.

1. Propagação de cheias: Considerando todas as possíveis causas de perdas de água ao longo do curso do rio. A propagação de cheias ocorre pela suplementação ocasionada pela precipitação diretamente sobre a calha e/ou suplementação da vazão da nascente. O SWAT simula o direcionamento das ondas de cheias através do canal utilizando um método de Williams ou o método de Muskingum.

2. Propagação de sedimentos: O transporte de sedimentos no canal é controlado pela operação simultânea de dois processos, deposição e degradação. Na versão atual do SWAT, a quantidade máxima de sedimento transportado é estimada com base no pico de velocidade no canal e utiliza a energia da água para transportar material ao longo da calha. A energia excedente é ajustada para modelar para o processo de erosão do leito do rio.

3. Propagação do nutriente: As transformações do nutriente no curso de água são controladas pelo componente de qualidade da água do modelo. O SWAT monitora as cargas de nutrientes dissolvidos no corpo hídrico e as parcelas que foram adsorvidas pelo sedimento. Obviamente, a parcela dissolvida segue com o fluxo hídrico enquanto que a parcela sorvida aos sedimentos pode sofrer deposição com o sedimento no leito do rio.

4. Propagação de pesticida no canal: Uma condição limitante no SWAT é que mesmo diante de uma infinidade de pesticidas existentes e que provavelmente são aplicados em uma HRU, o modelo somente consegue simular a distribuição, o ciclo de vida e as transformações químicas de um tipo por vez, em função da complexidade deste tipo de simulação. A simulação segue a mesma lógica aplicada aos nutrientes, e são divididos em duas frações, uma que segue dissolvida e outra que é adsorvida pelos sedimentos e sujeitos as mesmas condições de distribuição, degradação e transformações. Estes processos limitam-se as reações de decomposição de primeira ordem, sendo a decantação, o aterro, a ressuspensão, volatilização, a difusão e a transformação os principais processos simulados pelo modelo.

3.2.2.2 Propagação no reservatório

O balanço do fluxo hídrico da bacia para os reservatórios é dividido em: afluência, escoamento, precipitação na superfície, evaporação, infiltração do fundo do reservatório e desvio (NEITSCH, ARNOLD, *et al.*, 2009). Os componentes supracitados serão brevemente detalhados na sequência.

- Propagação do reservatório: O SWAT possibilita a simulação de três tipos de reservatórios. No primeiro caso o operador consegue obter os valores vertidos ou liberados por meio de medição. No segundo caso o vertimento ocorre sempre que o volume do reservatório exceder o volume máximo, então a água extra é liberada

em uma taxa específica. No terceiro caso o operador especifica as metas de volumes para o reservatório.

- Propagação de sedimentos: A entrada de sedimentos no reservatório é originária do transporte através dos canais a montante ou do escoamento superficial na sub-bacia. A afluência de sedimentos no reservatório é modelada tendo por base o volume, a concentração de afluência, escoamento e a água que fica retida no reservatório. A sedimentação é regida pelo equilíbrio de concentração e pelo tamanho da partícula. A liberação de sedimentos é o produto da vazão e da concentração de sedimento suspenso no reservatório durante a liberação.
- Nutrientes de reservatório: O ciclo de nutrientes no reservatório é modelado pelo método de Chapra, onde assume-se as seguintes condições: o lago é completamente misturado; o fósforo é o nutriente limitante; e o fósforo total indica o estado trófico do reservatório. O balanço de massa do fósforo considera a concentração, a afluência, o escoamento e a taxa de perda.
- Pesticidas de reservatório: Assim como no caso dos nutrientes o ciclo dos pesticidas no reservatório é modelado pelo método de Chapra e assume condições semelhantes de dispersão e sedimentação. O modelo consegue simular os seguintes processos: acumulações, escoamentos, transformação, volatilização, decantação, difusão, ressuspensão e aterro.

3.3 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS PLANIALTIMÉTRICOS

Para implementar um modelo no QSWAT, um dado fundamental para a simulação é o Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE utilizado na modelagem da BHRI possui resolução espacial de 30m e foi obtido através do Projeto TOPODATA, Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (BDGB), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e se baseia no processamento, correções e aprimoramentos dos dados “*Shuttle Radar Topography Mission*” (SRTM) de 1 arco-segundo, equivalente a um pixel de 30m, disponibilizado pelo United States Geological Survey (USGS) pela plataforma earthexplorer.- usgs.

As folhas de dados TOPODATA foram mosaicadas e processadas utilizando o software de geoprocessamento QGIS versão 3.4.1 – Madeira. O MDE resultante foi recortado para a área da BHRI utilizando um *shape* vetorial da área, obtido a partir da base de dados geográficos da Agência Nacional de Águas (ANA). O modelo foi corrigido eliminando pixels vazios e valores nulos utilizando o *script r.fillnulls* disponível na paleta raster do pacote de geotools GRASS acessível no QGIS através do menu processamento, caixa de ferramentas. O modelo corrigido serviu para a delimitação da BHRI e das sub-bacias hidrográficas que foram utilizadas na modelagem do Rio Ipanema, para a obtenção da malha de drenagem, do raster de direção de fluxos, dos pontos de nascentes e exutórios, obtenção da declividade do terreno, altimetria entre outros.

3.4 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE COBERTURA E USO

Na caracterização ambiental da bacia do Rio Ipanema, foi utilizado o raster de cobertura e uso do solo do ano de 2011, na escala de 1: 250.000, extraído do conjunto de multicamadas do bioma Caatinga, disponibilizado pelo Projeto MapBiomias, Coleção 4, lançada em agosto de 2019, abrangendo o período anual de 1985 a 2018. Os raster do MapBiomias cobrem todo o território do país, foram classificados pelo projeto utilizando algoritmos e procedimentos específicos para cada tipo de bioma brasileiro, gerando tanto os mapas dos biomas (Amazônico, Atlântico, Caatinga, Cerrado, Pampa e Pantanal); quanto mapas temáticos (Pasto, Agricultura, Floresta, Zona Costeira, Mineração, e Infraestrutura Urbana).

O MapBiomias processou seus mapas em nuvem por meio da plataforma Google Earth Engine utilizando um range de classificações abrangendo em média 23 observações de cobertura e uso anuais. Para tanto, foram utilizadas as metodologias definidas no handbook Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) disponibilizado pelo projeto por meio do seu workspace no endereço web <https://mapbiomas.org/atbd> tendo como data base os Data Archive Landsat (LDA), coleções Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8 disponíveis na plataforma.

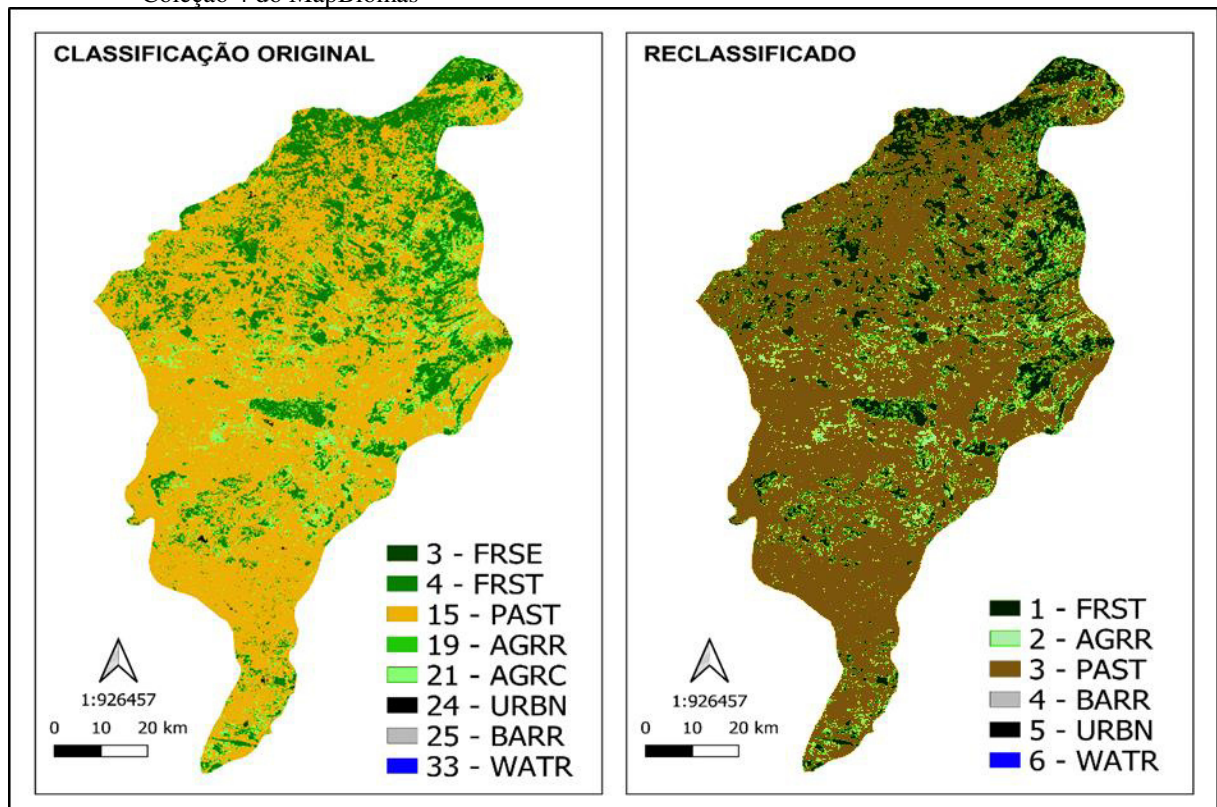
O pacote de dados do bioma Caatinga foi baixado da Coleção 4 e utilizando a calculadora raster do QGIS, foi realizada a extração da banda correspondente ao ano de 2011. Posteriormente à extração, a área correspondente à Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema (BHRI) foi recortada utilizando como máscara o *shape* da BHRI obtida a partir do banco de dados geográfico da ANA. Após o recorte, o raster obtido foi reclassificado (Figura 4) de forma a

reduzir a quantidade de observações a categorias de maior abrangência, e facilitar a análise dos dados e dos resultados.

Após a reclassificação do raster de cobertura foi necessário alimentar a base de dados do QSWAT para que o modelo conseguisse realizar a leitura e o processamento dos dados contidos no raster, esta alimentação se dá através de uma tabela índice contida na base de dados e denominada *Landuses*. Para tanto foram realizadas alterações nas tabelas do banco de dados do projeto Projeto_Nome.mdb (este arquivo é a base de dados do projeto e foi nomeado no momento da criação do modelo).

O QSWAT apresenta algumas falhas em ocasiões diversas, ditos “bugs” do modelo, logo para contornar alguns problemas é recomendável que se evite ao máximo alterar demasiadamente a estrutura de banco de dados ou suas tabelas. Em função disto, neste trabalho, optou-se por utilizar uma tabela já contida na base de projeto denominada *Example1_Landuses* na qual constam dois campos de dados: LANDUSE_ID e o SWAT_CODE (Figura 4). No campo LANDUSE_ID é cadastrado o valor do pixel do raster relacionado à um dado tipo de cobertura e uso. No campo SWAT_CODE é cadastrado o código da cultura, da cobertura vegetal ou natural, ou da cobertura artificial do terreno.

Figura 4 - Reclassificação dos raster de cobertura e uso do solo referente ao ano de 2011 obtidos a partir da Coleção 4 do MapBiomas

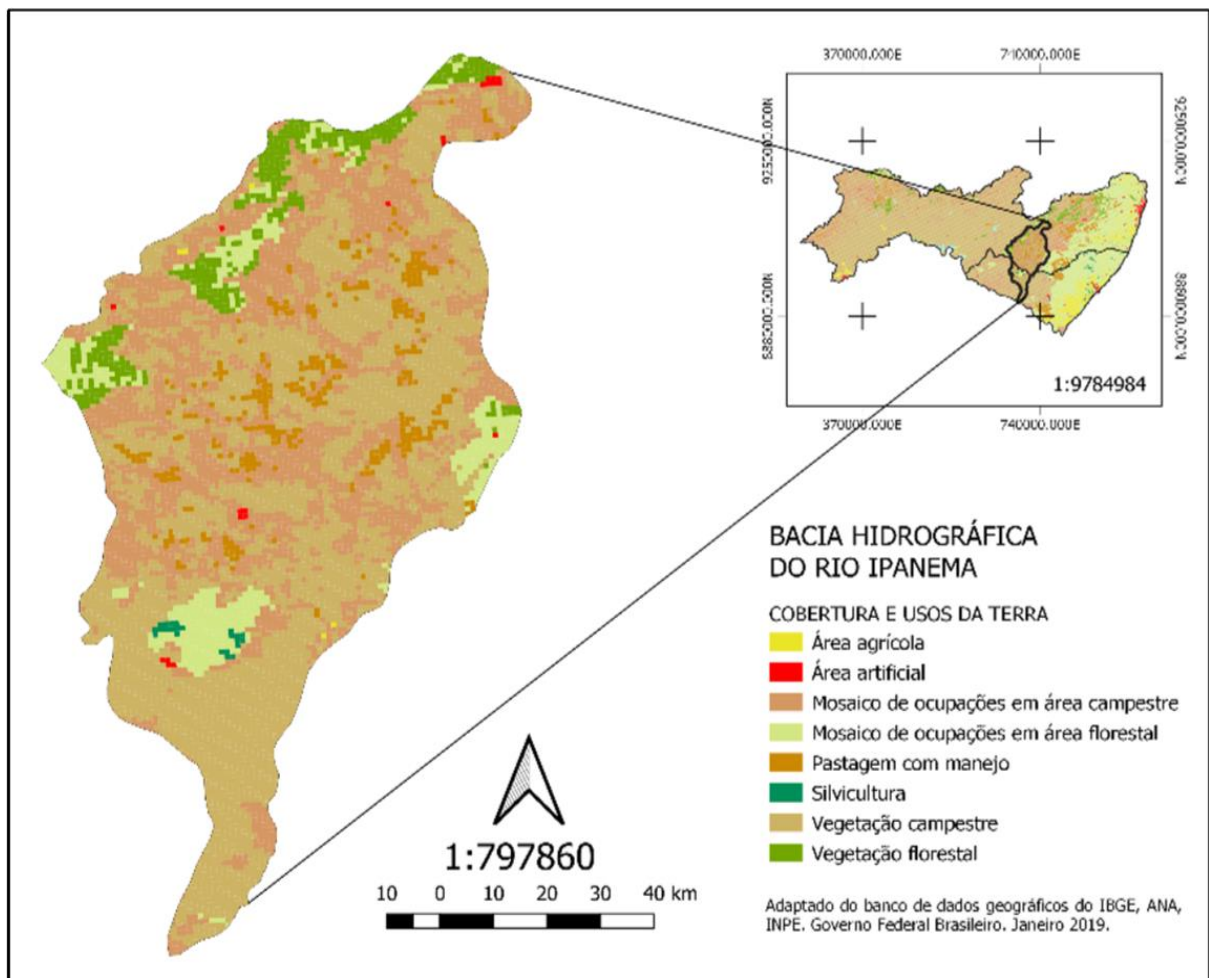


Fonte: Própria autoria, 2019

Para cada tipo de cobertura e uso um código padrão do SWAT deve ser inserido na tabela *Landuses*. Esta tabela nada mais é que uma variável, “um ponteiro matricial”, ela é responsável por receber a leitura do raster de cobertura e uso feita pela interface QSWAT e apontar para a base de dados do SWAT qual o tipo de cobertura é encontrado na área da bacia. O SWAT possui um padrão para estes códigos e suas descrições. Estas informações podem ser obtidas através da tabela CROP na base de dados do modelo QSWATRef2012.mdb, respectivamente nos campos CPNM e CROPNAME.

As informações cartográficas geradas a partir dos dados obtidos com o Projeto MapBiomass foram analisadas e comparadas com os levantamentos realizados pelo IBGE em 2014, apresentando convergência na distribuição espacial por tipo de cobertura, porém com classificações distintas. A carta de cobertura e uso do solo do IBGE é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Cobertura e uso da terra conforme o IBGE para a BHRI em 2014

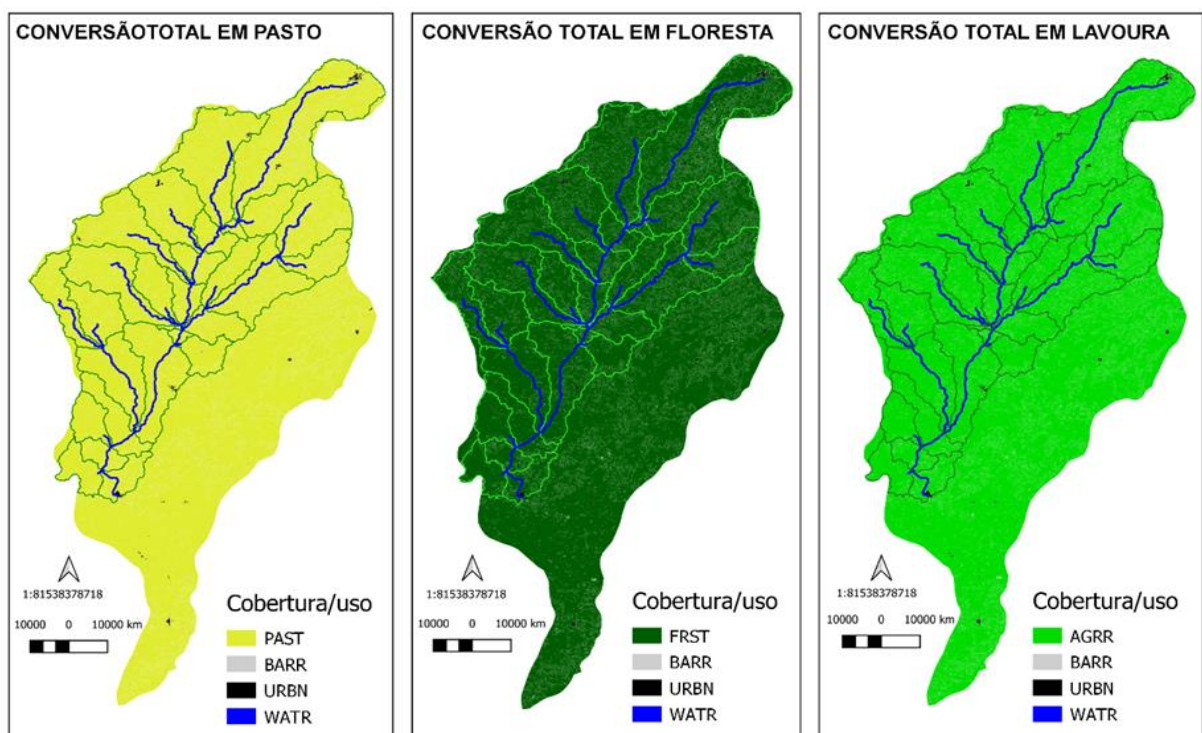


Fonte: Própria autoria, 2019

O modelo gerado com o raster reclassificado do MapBiomass 2011 foi utilizado para simular outros cenários após a calibração. Estes cenários são projeções extremas de alteração da cobertura e uso do solo. Foram pensados os cenários de conversão total da cobertura vegetal para pasto, floresta e lavoura (Figura 6). A ideia é comparar os efeitos das alterações de cobertura e uso do solo com as alterações no regime hidrológico, ponderando que as diferentes estruturas da vegetação de cobertura podem de alguma maneira interferir na estrutura do solo, no amortecimento e condução da água da precipitação até o solo, e posteriormente influenciar no processo de infiltração da água. A vegetação também vai alterar o estado de agregação e compactação do solo, tendo em vista características das raízes, tais quais profundidade e distribuição espacial. Estes cenários foram implementados através da ferramenta Land Use Update (.LUP), que permite fazer projeções temporais de atualizações em taxas percentuais de conversão de um tipo de cobertura e uso em outro tipo.

A projeção de cenários é uma prática que propicia a avaliação das intervenções humanas na bacia, como por exemplo a aumento da demanda de terras agricultáveis e por consequência o aumento da demanda de água; o crescimento das cidades e a impermeabilização do solo; ou mesmo o processo de desertificação em função das mudanças climáticas, são exemplos de cenários propostos e que podem ser implementados na modelagem com QSWAT.

Figura 6 - Cenários para simulação dos efeitos hidrológicos das alterações de cobertura e uso do solo na BHRI



Fonte: Própria autoria, 2020

Após a calibração e implementação dos cenários propostos foram extraídos do modelo dados referente a evapotranspiração máxima (ETM), fluxo hídrico subterrâneo (GW), produção de água (WY) e produção de sedimentos (SY). Estes foram os indicadores selecionados para avaliar quais as implicações de alteração da cobertura e uso do solo, pois permeiam a maioria dos processos e etapas do ciclo hidrológico, desde as interações atmosféricas, as pedológicas, passando pelo escoamento superficial e subterrâneo.

3.5 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS PEDOLÓGICOS

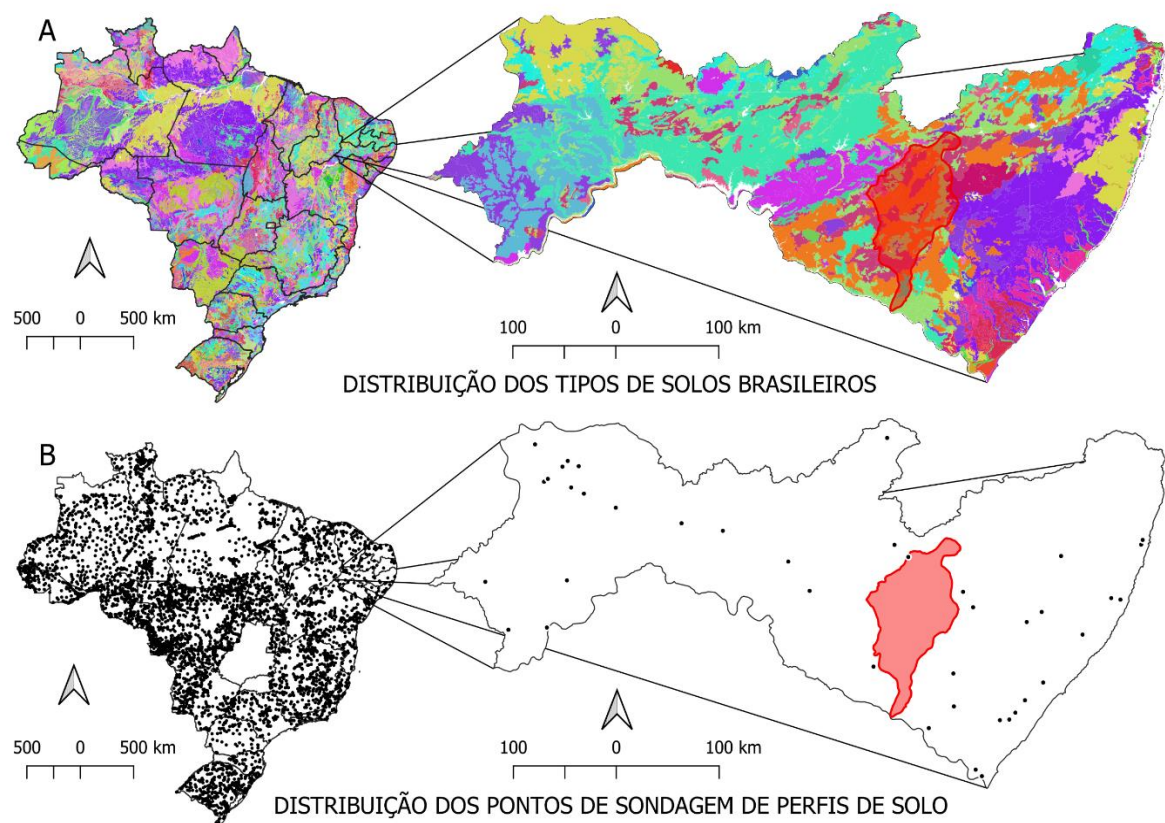
Outro dado importante na modelagem hidrológica com o SWAT é o mapa de solos da área de interesse, pois as características gerais dos solos influenciam diretamente no comportamento hidrológico. Estes dados foram obtidos da base de dados do IBGE. Estão disponíveis em formato vetorial tipo *shapefile* (.shp), em dois grupos de feições, polígono e ponto (Figura 7, A e B respectivamente), cada tipo com uma tabela de dados e informações distintas que se complementam e permitem a integração via Sistema de Informações Geográficas (SIG) com a base de dados de solos *Pedi_Comp.mdb*. A base *Pedi_Comp.mdb*, contém informações fundamentais a implementação da tabela de perfis de solos do SWAT, tais como fração de carbono orgânico, frações de silte, argila, areia, e rocha, horizontes de solo, suas classes e profundidades, pH, capacidade de troca iônica, salinidade, etc.

O trabalho de levantamento dos perfis de solo para a composição da base dados de solos do QSWAT somente foi possível em função da integração com o software QGIS, entre outros motivos em função do grande volume de dados dos pontos e perfis constantes da base de *Pedi_Comp.mdb*. Apenas na tabela de propriedades físicoquímicas são aproximadamente 24 mil horizontes de solo segmentados em 49 propriedades distribuídas em colunas. Esta base começou a ser construída com o Projeto RADAM BRASIL que percorreu praticamente todo território nacional entre os anos de 1970 e 1985 realizando mapeamento por radar e aerofotogrametria e em 1985 teve seu acervo incorporado ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Primeiramente os dados vetoriais disponíveis na base de solos do IBGE foram importados para o QGIS, onde foram sobrepostos e cruzados o *shape* poligonal da distribuição de tipos de solos, com os *shape* da área da bacia hidrográfica e o *shape* de pontos referente a localização dos pontos de sondagem e obtenção dos perfis. Após, foram identificados quais os tipos de solos compunham o espaço da bacia hidrográfica. Havendo delimitado e identificado

os tipos de solo, foi verificado se na área da bacia havia algum ponto de sondagem demarcado, e neste caso não havia, porém, as manchas dos tipos de solo se estendiam para além dos limites da bacia e em algumas destas áreas havia pontos de sondagem, logo estes pontos foram selecionados e identificados por meio da alteração de cor e símbolo.

Figura 7 - Distribuição de tipos solos e pontos de sondagem no território brasileiro com destaque para bacia do Rio Ipanema elaborado a partir do banco de dados geográficos do IBGE



A – Apresenta a distribuição dos tipos de solo em todo território brasileiro.

B – Apresenta a distribuição dos pontos de sondagem de perfis de solo.

Fonte: Própria autoria, 2020

Neste momento cabe chamar atenção sobre a impossibilidade do refinamento extremo dos dados, ou seja, não é possível esperar extrema qualidade dos dados nem mesmo que estes representem integralmente os perfis de solos da bacia, uma vez que não havia pontos de sondagem no interior da bacia a discretização por profundidade de solo ou sequências de horizontes finda por adquirir uma incerteza significativa, pois em função da ausência de pontos de sondagem no interior foi necessário fazer uma extrapolação e adotar os dados mais próximos a estas e do mesmo tipo de solo como representativos dos solos da bacia.

Utilizando a ferramenta *sampling points tool* do QGIS, que possibilita que uma malha de pontos vetoriais possa realizar a extração e o cruzamento de dados de outras camadas vetoriais ou de raster com a tabela do vetor de referência, foi possível unir os índices identificadores dos perfis de solo da base vetorial com os perfis registrados na base *Pedi_Comp.mdb*. A partir do cruzamento de informações foram geradas algumas consultas filtrando a base com os pontos identificados no QGIS, obtendo, portanto, os dados dos perfis de solos da BHRI.

Estes dados foram tabelados utilizando o Software de planilha eletrônica Microsoft Office Excel 2013 resultando em 12 perfis de solo dos quais foram extraídos os seguintes dados: fração de carbono orgânico do solo, fração de argila, fração de silte, fração de areia, fração de rocha. Estes dados foram copiados e inseridos no template de cálculo de parâmetros de solos desenvolvido por Saxton e Rawls (2006), “*Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*”, para cálculo dos demais parâmetros de solo necessários a implementação da base de solos da BHRI no QSWAT.

Este procedimento é simples, porém é necessário realizar a leitura do artigo publicado pelos autores para divulgar a ferramenta e entender como ela funciona. Feita a cópia das colunas referentes aos cinco dados de solo que foram selecionados previamente, é necessário criar uma nova sequência de registros na tabela *soildata* do *template*, retornar à tabela *read me* e acionar o botão *Forme Usersoil*, o MsOffice vai demorar alguns minutos até gerar todos os dados necessários. Após este processamento, os *scripts* e macros implementados no *template* deverão ter gerado e preenchido a tabela *Usersoil* na mesma posição da sequência de novos registros que foram criados anteriormente.

A tabela *Usersoil* apresenta uma estrutura igual à tabela *Usersoil* do banco de dados do QSWAT, com os seguintes campos de dados: Object Id, Muid, Seqn, Snam, S5id, Cmpppt, Nlayers, Hydgrp, Sol_Zmx, Anion_Excl, Sol_Crk, Texture, Sol_Z1, Sol_Bd1, Sol_Awc1, Sol_K1, Sol_Cbn1, Clay1, Silt1, Sand1, Rock1, Sol_Alb1, Usle_K1, Sol_Ec1,... Foi necessário alimentar a base de dados de solos do QSWAT. O procedimento para alimentar o banco de dados do QSWAT, foi realizado diretamente nas tabelas do banco de dados, em duas bases: QSWATRef2012.mdb e projbhri.mdb.

Na base QSWATRef2012.mdb foi adicionada, na sequência da tabela, os registros de dados de solo gerados pelo *template*, o procedimento foi repetido na base de dados projbhri.mdb. A base projbhri.mdb é a base de entrada de dados advindos da interface do QSWAT. Logo, esta base possui três tabelas fundamentais para o funcionamento da interface e para rodar o modelo: usersoil, soils e landuses.

O QSWAT possui algumas falhas de código, para evitá-las é necessário manipular o mínimo possível os dados em nível estrutural do código ou do banco de dados, por tanto, com a finalidade de evitar problemas é recomendável que se utilize das estruturas de tabelas já presentes na base de dados. Tendo em vista o que foi exposto anteriormente na modelagem da BHRI foram feitas cópias de backup das tabelas *Example1_usersoil*, *Example1_soils* e *Example1_landuses*, e nos originais foram alimentados os dados do modelo BHRI.

Neste tópico foram trabalhadas apenas as tabelas *Example1_usersoil* e *Example1_soils*, a primeira é uma cópia da tabela *Usersoil* da base de dados QSWATRef2012.mdb, - deve-se ter atenção de sempre que atualizar uma das bases realizar o mesmo procedimento na outra caso contrário certamente ocasionará erro ao modelo no processamento das informações pedológicas - , a segunda é uma tabela de índice, é por meio dela que o modelo relaciona os dados da tabela de solos na base de dados, com o raster utilizado na interface QSWAT para representar a distribuição dos tipos de solos no espaço da bacia por meio dos valores associados aos pixels do raster.

Na tabela *Example1_soils* existem duas colunas, *SOIL_ID* e *SNAM* respectivamente. A coluna *SOIL_ID* refere-se aos valores associados à cada pixel do raster de solos, que deverá ser utilizado na interface QSWAT no momento da estruturação do modelo. A coluna *SNAM* refere-se à sigla do nome do tipo de solo que foi alimentado nas bases do QSWAT e do Projeto, esta coluna é utilizada como campo chave na busca por registros na base de dados do modelo. A cada pixel identificado no raster de solo é atribuído um tipo de solo na base de dados.

Uma segunda forma de alimentação da base de solos do QSWAT é diretamente através da interface do software no QGIS, porém esta interface somente é habilitada após a etapa de geração das HRU's e para isto o banco de dados do modelo já deve estar estruturado e preenchido.

Deste modo a base de solos do projeto foi constituída, por meio de levantamento e garimpo de dados nos sites dos serviços públicos e pesquisa geográfica e estatísticas, utilização extensiva de tecnologias de SIG para processar os dados obtidos, seleção dos dados mais representativos ou próximos as condições da bacia, utilização de ferramentas de software para processamento e obtenção de dados secundários e implementação das bases de dados necessárias a modelagem da BHRI no QSWAT.

3.6 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS HIDROCLIMÁTICOS

Os dados de clima foram adquiridos por meio da base de dados do professor e pesquisador Alexandre Candido Xavier, e estão disponíveis em seu site <https://sites.google.com/site/alexandrecandidoxavierufes/home?authuser=0>, os quais foram acessados entre janeiro e junho de 2019. Os dados e estão disponibilizados em formato de grade NetCDF cobrindo todo o território brasileiro, e foram interpolados em escala diária a partir das aferições de estações climáticas físicas adquiridas por meio das bases de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Como os dados são fornecidos em formato de grade NetCDF, para a extração foi necessário utilizar um algoritmo em R, o software R Studio versão 1.2.5033 e a plataforma R 64 bits 3.6.2.

Foram ao todo 9.259 equipamentos e pontos de medição levantados das referidas bases de dados climáticos (Xavier *et al.*, 2017). A pesquisa de dados climáticos na base do Xavier (2019) retornou pacotes de dados com um período de abrangência com início em 01/01/1980 a 31/07/2017, com exceção dos dados de precipitação que abrangem até o dia 31/12/2016. Foram levantados os dados de Precipitação (PCP - mm), Temperatura máxima e mínima (TMP - °C), Umidade relativa (HMD - %), Radiação solar (RS – MJ.m⁻²), e Velocidade do vento (WND – m/s).

A opção pelo o uso dos dados interpolados por Xavier (2019), se dá por alguns fatores: facilidade de obtenção de um grande volume de dados processados e com tratamento estatístico em uma única fonte, economia de tempo e esforço no trabalho de levantamento e catalogação das estações e seus atributos como período de cobertura, variáveis climáticas aferidas, etc. A pesquisa ao dado bruto demanda que para cada estação climática catalogada haja a necessidade de tratamento estatístico, preenchimento de falhas, consolidação dos dados e validação dos procedimentos realizados.

Xavier *et al.* (2016) optou por utilizar dois métodos principais de interpolação: a ponderação de distância angular (ADW), e a ponderação do inverso da distância (IDW). E para validar os dados interpolados utilizou um método de análise cruzada. As interpolações foram realizadas considerando uma grade com resolução de célula de 0,25° x 0,25°, totalizando 11.299 células para todo o território brasileiro, sendo que a cada célula tem-se um único valor central de precipitação obtidos a partir da média aritmética não ponderada de 25 interpolações por célula a cada 0,05° de distanciamento.

Os métodos IDW e ADW adotados por Xavier *et al.* (2016) encontram-se bem detalhados e equacionados em seu trabalho “*Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980 – 2013)*”. No método IDW, o valor interpolado para uma determinada célula é calculado e ponderado por um fator que é inversamente proporcional à distância do centroide da célula ao ponto de entrada de dados da estação meteorológica. No método ADW a ponderação do valor de precipitação para cada célula é feita com base em dois métodos e fatores de peso. O primeiro deles é o método da Correlação por Deterioração pela Distância (CDD), que considera um decaimento no valor do fator de peso derivado a partir do afastamento do ponto de interpolação do ponto de entrada de dados meteorológicos observados. O segundo é o método da variação angular que considera a variação do fator de peso com base na variação da abertura angular entre as estações de referência com vértice no ponto onde se deseja interpolar.

A validação dos métodos de interpolação e dos resultados foi realizada por meio da análise de validação cruzada, que consiste basicamente em tomar pontos observados do conjunto de dados de precipitações, remove-los do conjunto. Para cobrir as lacunas abertas, utilizar os mesmos métodos de interpolação utilizados para gerar a grade de dados e no final comparar estatisticamente o dado simulado com base em dados interpolados com o dado observado das estações meteorológicas. Xavier *et al.* (2016) realizou todos os passos descritos e validou o processo utilizando as seguintes funções estatísticas: Coeficiente de correlação (R), Raiz Quadra do Erro Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Relativo Composto (CRE), Índice Crítico de Sucesso (CSI) e Porcentagem Correta (PC).

Os dados do Xavier (2019) se destinam a atender uma demanda dos pesquisadores e estudiosos da modelagem hidroclimática por dados de clima confiáveis, com qualidade e continuidade no espaço e no tempo, e que cubra todo o território brasileiro. O SWAT utiliza uma base com dados climáticos pré-processados para alimentar o seu gerador climático, necessitando de dados robustos tanto para a etapa de composição da base de predição climática quanto para alimentar as folhas de dados de entrada na fase de pré-simulação.

Para garantir a representatividade do modelo à região da bacia hidrográfica do Rio Ipanema foi adotado como critério para extração dos dados meteorológicos, utilizar as coordenadas de localização real das estações. É pacífico que os dados do Xavier (2019) foram interpolados a partir de estações reais, e que os dados observados integram a grade de dados interpolados; e ainda, que a extração destes valores é realizada por meio da aplicação de um algoritmo e que este utiliza coordenadas geográficas decimais para referenciar os pontos no espaço, é possível inclusive realizar o processamento desses dados em formato de raster utilizando linguagem R, linguagem Python, ou mesmo um software de SIG.

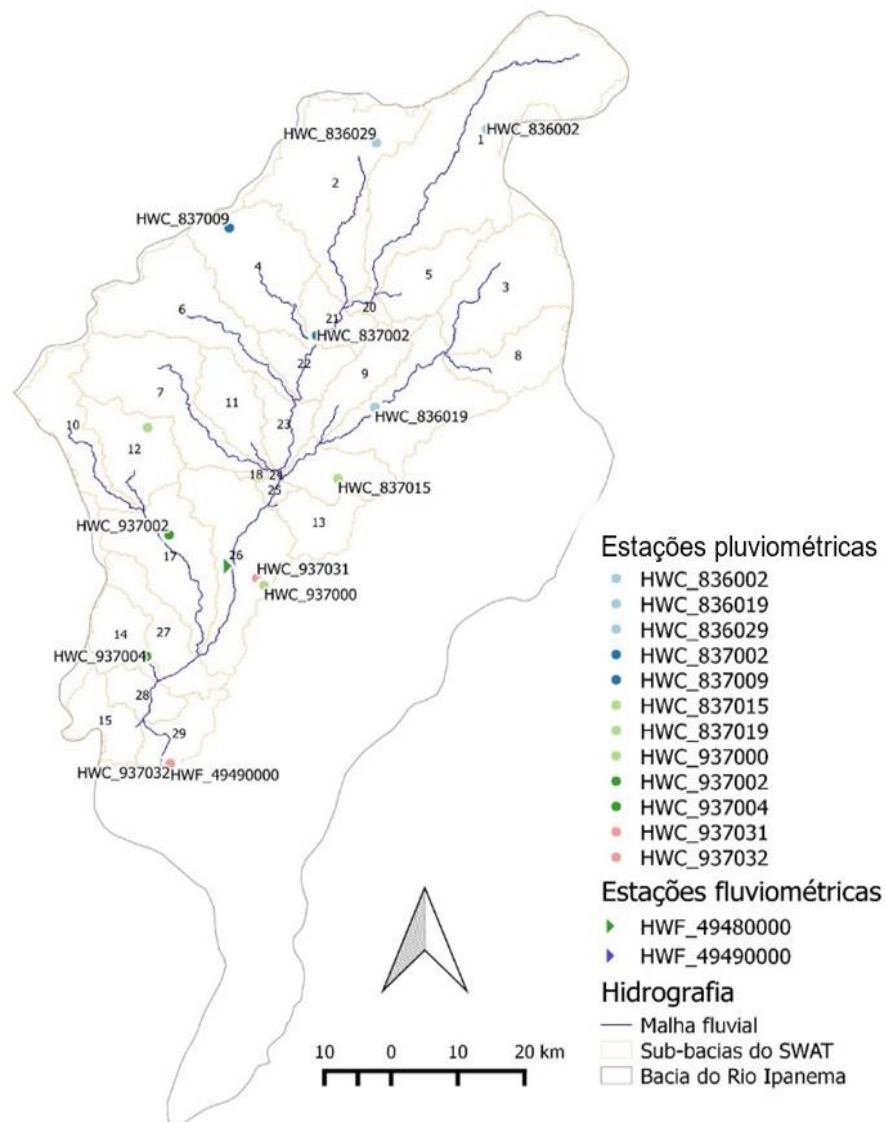
Foi feito um levantamento dos dados das estações reais no site HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA) com o objetivo de utilizar as coordenadas das estações reais, e obter também a altitude em que o equipamento foi instalado, desta forma, conforme já foi abordado, os valores a serem extraídos das grades de dados interpolados serão mais próximos dos reais possível para os períodos em que as estações reais operaram, para os períodos em que as estações não estiveram operantes é garantido o preenchimento das falhas por interpolação proporcionando continuidade no tempo aos dados, com a garantia também da qualidade pelo tratamento estatístico prévio.

De acordo com informações colhidas no site de referência <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsfv>, acessado em 31 de janeiro de 2019. O portal HidroWeb integra a plataforma de utilitários de hidrologia que compõe o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), por meio dele é possível ter acesso a algumas informações importantes sobre as condições climáticas e fluviais das regiões com estações de monitoramento cadastradas e operantes.

O sistema on line possibilita o acesso ao banco de dados da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), e reúne dados de estações fluviais e pluviais: vazões, precipitações, climatológicos, qualidade da água, sedimentos, entre outros. Os dados disponíveis no HidroWeb são alimentados por meio de coleta convencional, tratam-se de registros diários alimentados por observadores da ANA e resultados de medições realizadas por técnicos da agência em todo o território nacional. Ainda é possível ter acesso à dados em tempo real utilizando o Portal Telemetria por meio do endereço eletrônico <http://www.snirh.gov.br/gestorpcd>.

A partir da pesquisa realizada no portal HidroWeb, foi possível identificar 12 estações pluviométricas e duas estações fluviométricas (Figura 8), para ambas as tipologias os equipamentos possuíam séries de dados disponíveis, porém a variação no volume de dados e na qualidade dos dados não viabilizava a utilização de todas as estações e as que restavam necessitavam de um grande esforço para tratar os dados e consolida-los. Algumas estações apresentavam muitas duplicidades nos valores, outras, duplicidades na aferição para o mesmo dia e hora, porém valores diferentes, algumas apresentavam muitos valores discrepantes que necessitavam de análise para verificar se tratava-se de out layer ou meramente um erro do equipamento. Muitas estações apresentaram períodos distintos de aferição, algumas com grandes lacunas de dados ou anos de leitura zerada.

Figura 8 – Rede de monitoramento hidroclimático da BHRI



Fonte: Própria autoria, 2020

A partir dos levantamentos feitos no portal HidroWeb foram obtidas as localizações das estações meteorológicas a partir das quais foram realizadas as extrações dos dados das bases do Xavier (2019) atendendo ao critério preestabelecido de utilização de dados georreferenciados para estações reais. Neste trabalho foi adotado um padrão de nomenclatura para as estações conforme segue: HWC significa HidroWeb Climático, e a sequência de números compõem o código da estação no sistema; HWF significa HidroWeb Fluviométrico se aplicando a mesma regra anterior para a sequência de números.

Tabela 2 - Coordenadas das estações inseridas na BHRI levantadas no portal HidroWeb

Station Code	Station Name	WGS84 CGS		SIRGAS 2000 UTM 24S	
		Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
1	HWC_836002	-36,8188	-8,47501	9061963,24	740000,63
2	HWC_836029	-36,96989	-8,49929	9059840,37	723468,34
3	HWC_837009	-37,17163	-8,61957	9046677	701381,03
4	HWC_837002	-37,04905	-8,76758	9030019,12	714505,69
5	HWC_836019	-36,96987	-8,86884	9018910,2	723249,27
6	HWC_837015	-37,28236	-8,89779	9007877,9	717689,1
7	HWC_837019	-37,01847	-8,97078	9015764,22	689130,92
8	HWC_937002	-37,25115	-9,0492	8999157,79	692351,61
9	HWC_937031	-37,12986	-9,10922	8992455,36	705511,58
10	HWC_937000	-37,12094	-9,1209	8991343,51	706605,2
11	HWC_937004	-37,27985	-9,21849	8980370,54	688963,56
12	HWC_937032	-37,27985	-9,21849	688980,557	8980537,17

Fonte: Própria autoria, 2020

Após a extração, a estação HWC_937032 foi desconsiderada tendo em vista a sua localização ao lado o exutório da bacia pois, os valores aferidos contribuem pouco para as vazões no ponto. Os dados obtidos foram ordenados por tipo de dado, estação e localização utilizando o MSOffice Excel 2013 e foram gerados arquivos distintos para cada tipo de dado e uma tabela semelhante a Tabela 2 contendo o código da estação, o nome da estação, as coordenadas UTM, e a descrição.

Estes arquivos serviram para a geração das folhas de dados climáticos de entrada na fase de alimentação das “*Weather Stations*” e da tabela WGEN_user que integra a base de dados climáticos do modelo QSWAT. A tabela WGEN_user é utilizada pelo gerador climático do SWAT para a predição e complementação de valores faltantes e que são representados nas folhas de dados pelo valor -99. A geração da tabela WGEN_user é obrigatória mesmo que não seja necessária à sua utilização, sem implementar esta tabela não é possível utilizar o modelo. Sua implementação e preenchimento iniciais foram executadas manipulando a tabela diretamente na base de dados.

Para a geração das folhas de dados climáticos de entrada bem como da tabela estatística WGEN_user, foi utilizada a ferramenta chamada “*SWAT Weather Database*” ou “Ferramenta para Estimativa de Parâmetros WGN” que foi baixada diretamente da página do Projeto SWAT, <http://www.swat.tamu.edu/>.

Os dados fluviométricos também apresentaram má qualidade e grandes lacunas nos valores ao longo do tempo, além de valores errados e discrepantes, em função disto foi necessário realizar análise de consistência dos dados. Para avaliar a coerência dos dados

procedeu-se o preenchimento das lacunas com a média dos valores disponíveis no mês, dia a dia onde estivesse sem dados. Quando não houve a possibilidade de se proceder desta forma o valor do dado foi interpolado.

Após o trabalho de preenchimento de falha, foi necessário eliminar os valores discrepantes, isto foi feito considerando intervalo de dez anos em dez anos, resultando em três períodos com dez anos e um período com sete anos para cobrir todo os anos disponível para simulação (1980 a 2016). Desta forma foi tomado o valor médio do acumulado mensal da precipitação (PREC) para o intervalo de anos. Calculada a área da bacia drenada e modelada. Calculadas as vazões, lateral (LATQ) e a máxima potencial (QMAX), com base na precipitação e na área drenada, e admitindo que não ocorreram perdas de nenhuma espécie. Também foi calculado o coeficiente de escoamento (CE). O CE aplicado sobre a QMAX resultou na vazão de referência (QREF) que passou a ser considerada o valor de corte para as vazões discrepantes no volume de dados. Qualquer valor de vazão acima de QREF (Tabela 3) foi substituído por este valor de referência. As médias, mínimas e máxima mensais do volume de dados também foram recalculados o que possibilitou identificar erros de virgula e/ou importação e manipulação dos dados. Estes erros sempre que identificados e possível, foram corrigidos.

Tabela 3 - Cálculo do valor de referência das vazões para eliminação de discrepâncias

MÉDIAS MENSAIS ANUAIS			Área =	4714,597	CE=	0,4
TIME	PREC*	LATQ	LATQ	PREC	Q MAX	Q REF
	mm	mm	m ³ .s-1	m ³	m ³ .s ⁻¹	m ³ .s-1
1	250,0	30,06	54,676	1178649250	454,7	181,9
2	118,0	27,75	50,475	556322446	214,6	85,9
3	45,0	6,25	11,368	212156865	81,9	32,7
4	31,7	2,44	4,438	149452725	57,7	23,1
5	52,6	4,08	7,421	247987802	95,7	38,3
6	181,6	23,95	43,563	856170815	330,3	132,1
7	110,1	12,09	21,991	519077130	200,3	80,1
8	79,2	14,04	25,537	373396082	144,1	57,6
9	58,3	6,38	11,605	274861005	106,0	42,4
10	1,7	0,8	1,455	8014814,9	3,1	1,2
11	2,2	0,06	0,109	10372113,4	4,0	1,6
12	3,7	0,05	0,091	17444008,9	6,7	2,7

*Média do mês no período de 2000 à 2009 (10 anos)

Fonte: Própria autoria, 2020

3.7 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO NO SWAT

Foi utilizado o plugin do SWAT 2012 para o QGIS 2.6.1 – Brighton, QSWAT versão 1.7 para Windows 32 bits. Processado em uma máquina Samsung da série Expert

NP350XAA-XF3BR com Microsoft Windows 10 versão 10.0.18362 baseado em x64 bit com processador Intel(R) Core(TM) i7-8550 CPU @ 1.80GHz, 1992 Mhz, com 4 núcleos físicos e 8 processadores lógicos, BIOS American Megatrends Inc. P03REP.034.181016.ZW versão SMBIOS 3.1 com 8Gb de memória RAM, placa gráfica NVIDIA GEFORCE com 2Gb de memória interna e Drive SD de 240Gb.

A base da estruturação do modelo no QSWAT é a criação de seu banco de dados, que é feito em conjunto com a criação do projeto no QGIS. Logo foi aberto um projeto de modelo e salvo com o nome *projbhri.qgs*, neste momento o QSWAT cria a estrutura de pastas e banco de dados do modelo e passa a alimentar essa estrutura à medida que as camadas de dados em formato raster vão sendo inseridas no modelo, processadas e parametrizadas.

A primeira camada de dados é o raster do MDE, que deve ser inserido no passo “*Delineate Watershed*”, e conforme já foi demonstrado, neste estudo foi utilizado o MDE TOPODATA de 30 m de resolução. Após apontar o MDE, foi necessário definir a quantidade de células do modelo e a área de cada uma delas, neste estudo foram definidas 100 mil células de 9 mil hectares cada, a definição da quantidade de células e de suas respectivas áreas, é necessário para a geração da malha de drenagem da bacia.

Após a geração da malha de drenagem deve-se realizar a delimitação das sub-bacias, para tanto foi necessário selecionar um ponto de exutório da sub-bacia, este ponto foi obtido tomando como referência uma das estações fluviométricas selecionadas anteriormente no portal HidroWeb. Foi tomado como ponto exutório, o ponto nas coordenadas da estação HWF_49490000, disponíveis em padrão UTM, zona 24S, Datum Sirgas 2000, latitude 692537.609, e longitude 8963418.506. Este ponto foi marcado no QSWAT como ponto de saída de fluxo hídrico que no modelo é nomeado de “*outlet*”, e a partir deste ponto foram delineadas as sub-bacias do projeto (Figura 9). Após esta etapa o QSWAT começa a gerar relatórios do processamento, o primeiro deles é o relatório de elevações *TopoRep.txt* onde é possível encontrar as elevações máximas, mínimas, média e a moda, bem como os percentuais em área destas elevações e o percentual de área da sub-bacia ocupada por estas elevações.

Os dados gerados nos relatórios e tabelas de processamento do SWAT são a base para a determinação de fatores e índices muito usuais da caracterização física de bacias hidrográficas pela hidrologia, são estes fatores a declividade equivalente (I_{eq}), o tempo de concentração (T_c), velocidade média de escoamento (V_m), coeficiente de compacidade (K_c), o fator de forma (K_f), e o índice de conformação (I_c).

Declividade equivalente (I_{eq}) pelo método da média harmônica

A declividade nada mais é que a inclinação da bacia, ou a variação altimétrica entre as nascentes e o exutório. O método harmônico trata-se da razão ao quadrado estabelecida entre o comprimento total do canal principal, dividido pela somatória da razão entre os comprimentos dos trechos, sobre a raiz quadrada da inclinação do trecho.

$$L = \sum L_i \quad (i) \quad \therefore I_i = \frac{\Delta H_i}{L_i} \quad (ii) \quad \therefore I_{eq} = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{I_i}}} \right]^2 \quad (iii) \quad (\text{Equação 3})$$

em que: L é o comprimento total do canal principal da bacia em Km, L_i é o comprimento do trecho i do canal em Km, I_i é a declividade do trecho i em $m.Km^{-1}$, ΔH_i é a variação de altitude em metros (m), e o I_{eq} é a declividade equivalente em $m.Km^{-1}$.

Tempo de concentração (T_c) pelo método de Kirpich

É o tempo (min) necessário para que a água precipitada em uma bacia passe a contribuir com o fluxo hídrico da secção principal do rio.

$$T_c = 57 \left(\frac{L^2}{I_{eq}} \right)^{0,385} \quad (\text{Equação 4})$$

em que: L é o comprimento total do canal principal da bacia em Km, e o I_{eq} é a declividade equivalente calculada anteriormente em razão de $m.Km^{-1}$.

Velocidade média de escoamento (V_m)

A velocidade média (V_m) de escoamento nada mais é que o espaço percorrido pela água, ou seja, o L em metros dividido pelo T_c em segundos.

$$V_{m(m.s^{-1})} = \frac{L * 1000}{T_c * 60} \quad (\text{Equação 5})$$

em que: L é o comprimento do canal principal em metros (m), T_c é o tempo de concentração em minutos (min).

Os coeficientes em sequência estão relacionados as proporcionalidades e relativas ao perímetro, a área, ao comprimento e ao formato da bacia, o que está diretamente relacionado as tendências de a bacia apresentar inundações e enchentes.

Fator de forma (Kf)

$$K_f = \frac{L_m}{L_{ax}} \quad (\text{Equação 6})$$

em que: L_m é a largura média da bacia medida em Km e o L_{ax} é a largura axial da bacia medida em Km, conforme desenvolvido por Andrade *et al.* (2008).

Coeficiente de compactidade (Kc)

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equação 7})$$

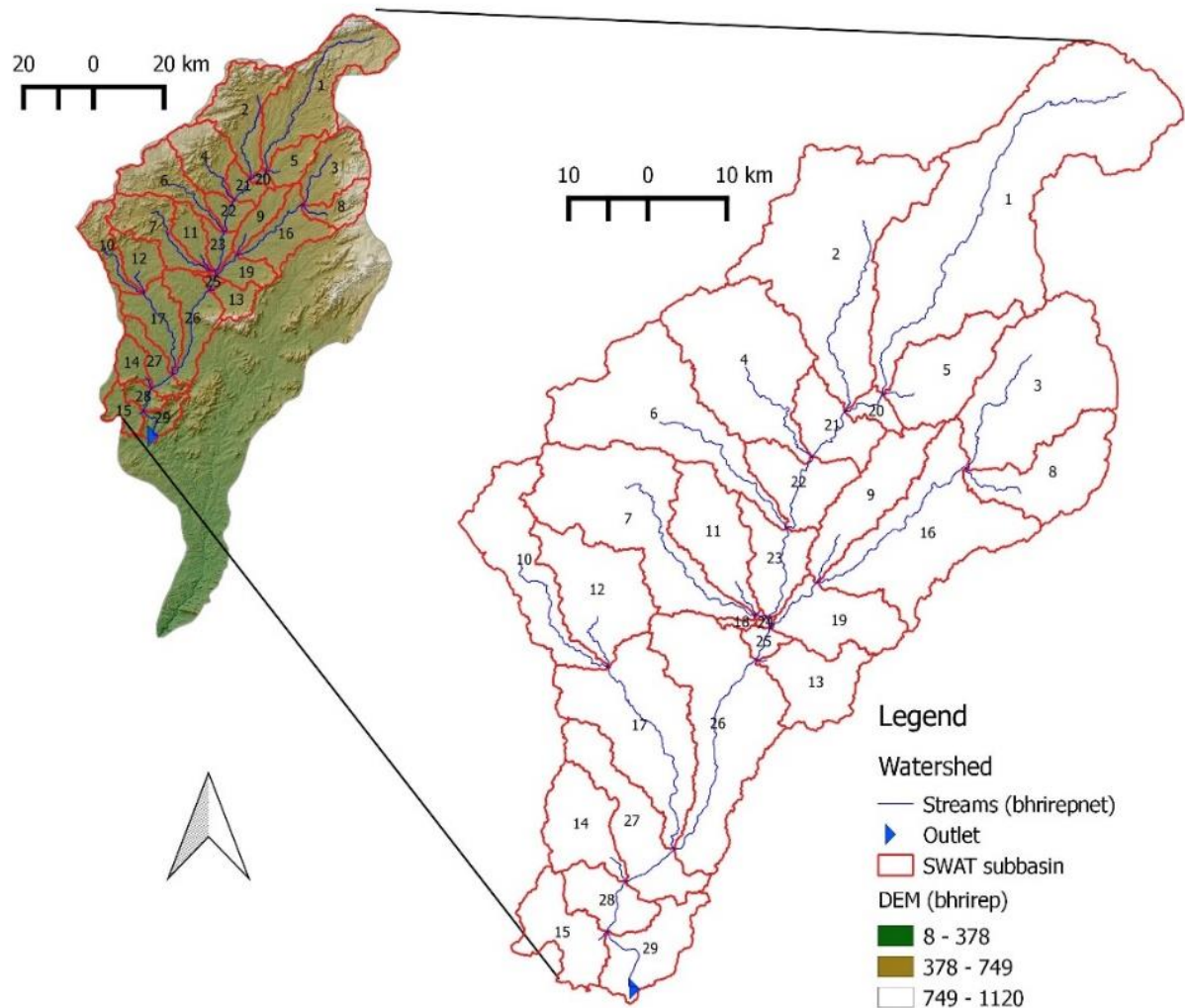
em que: P é o perímetro da bacia medido em Km e A é a área da bacia medido em Km², conforme desenvolvido por Andrade *et al.* (2008).

Índice de conformação (Ic)

$$I_c = \frac{12,57 \cdot A}{P^2} \quad (\text{Equação 8})$$

em que: P é o perímetro da bacia medida em Km e A é a área da bacia medida em Km², conforme desenvolvido por Andrade *et al.* (2008).

Figura 9 - Delimitação da sub-bacia hidrográfica modelada na BHRI



Fonte: Própria autoria, 2020

Seguindo com a estruturação do modelo da BHRI no QSWAT, o passo seguinte ao delineamento das sub-bacias é a etapa de criação das HRU's (Unidades de Respostas Hidrológicas), é a etapa mais difícil da modelagem até o momento da inserção dos raster de cobertura e uso e de solo, isto por que o levantamento de dados confiáveis para estes dois parâmetros do QSWAT não é simples devido à dificuldade de obtenção dos dados, de se conseguir fontes apropriadas e posteriormente processar estas informações até chegar nos raster que integram o modelo. Os procedimentos de para obtenção e tratamento destes dados já foram bastante detalhados nos itens anteriores.

Para que esta etapa da modelagem funcionasse perfeitamente os bancos de dados do modelo foram preenchidos, com antecedência, com os dados de solo e cobertura conforme já demonstrado, logo, procedimento aqui foi acionar o formulário de criação das HRU's, e nos campos apropriados apontar os arquivos raster, normalmente um arquivo de imagem “.tiff” ou

“.geoTiff”, e as tabelas de índice para cada raster. Apontados os dados e suas localizações no armazenamento do computador, executa-se a leitura dos dados e o modelo começa a processar as informações e alimentar as demais tabelas de sua base de dados.

Concluída a leitura dos dados, o modelo solicita o preenchimento de alguns parâmetros e configurações: o range de declividades em percentual (“*Set bands for slope*” (%)), o método de criação de HRU’s (“*Single/Multiple HRU’s*”). No range de declividades foram implementadas as faixas de valores adotadas pela EMBRAPA (1979): 3%, 8%, 20%, 45%, e 75%. O método de criação de HRU’s adotado foi o da HRU dominante em função da pouca variabilidade de cobertura e uso da bacia, este método não segmenta demasiadamente o espaço, desta forma demanda menos recursos computacionais e processa mais rapidamente os dados, atribuindo a cada sub-bacia uma única HRU. Com todos os parâmetros preenchidos foram geradas as HRU’s.

Na etapa seguinte foi possível acessar o formulário do SWAT Editor e partir deste ponto ter acesso ao menu “*Write Input Tables*” e a uma maior variedade de menus e interfaces para acesso ao banco de dados, possibilitando maior praticidade na edição, inserção e ou exclusão de dados e configurações. Foi realizada a inserção das folhas de dados climáticos, configurada a Tabela do Gerador Climático do SWAT (“*Weather Stations - Weather Generator Data*”) e posteriormente pôr o SWAT para rodar no período de aquecimento.

3.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO

A análise de sensibilidade dos parâmetros à uma condição de modelagem projetada é fundamental para a verificação das respostas do modelo às entradas de dados e como que determinados fenômenos ocorrentes na bacia são representados no modelo. Quanto maior ou menor a quantidades de vezes que recursivamente o modelo faz uso de um dado parâmetro e altera seu valor, diz-se que o modelo é mais ou menos sensível ao parâmetro. Segundo Marinoé (2013), a análise de sensibilidade possui várias razões para ser realizada, algumas delas são: concentrar esforços de pesquisa e estudo em parâmetros específicos, eliminar parâmetros sem importância ao modelo, identificar quais parâmetros retornam maior variabilidade de respostas, e determinar quais parâmetros se correlacionam mais fortemente.

Para calibração do modelo foram utilizados os dados fluviométricos que foram consistidos e cuja explicação do método está no subcapítulo 3.5. A estação exutório é a

HWF_49490000, os dados brutos foram obtidos através do portal HidroWeb da ANA. A calibração dos parâmetros do modelo foi realizada de forma automática utilizando com SWAT CUP e o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting versão 2^a (SUF2). O SUFI2 utiliza o método conhecido como hipercubo latino e parte de condições de contorno estabelecidas pelo usuário para estabelecer a faixa de ajuste dos parâmetros. Os parâmetros são ajustados pelo SUFI2 a partir de rodadas consecutivas do algoritmo do SWAT com número de repetições definidas pelo usuário. A cada rodada os parâmetros são comparados aos resultados, reajustados e postos a rodar novamente até o melhor refinamento (Brighenti *et al.*, 2016). O SWAT CUP é reconhecidamente a ferramenta mais adequada para a calibração automática e análise de incertezas e sensibilidade do SWAT.

O modelo foi rodado para aquecimento de 1990 a 1999, perfazendo um período de dez anos. Posteriormente o modelo foi ajustado com base na simulação dos dez anos seguintes de 2000 a 2009, conforme o método 70/30 para divisão de registros para calibração e validação proposto por Klemes (1986), onde 70% dos registros de vazões observadas são inicialmente utilizados para calibrar e 30% usados para validar, desta forma foram selecionados os valores de vazões no range compreendido entre 2000 a 2006 para calibrar e posteriormente de 2007 a 2009 para validar.

Em seu trabalho Teklay *et al.* (2019), considerou um total de 18 parâmetros hidrológicos para calibração do modelo com SWAT, com base neste experimento foram selecionados 15 parâmetros os quais foram considerados coerentes com a modelagem do Rio Ipanema e sua bacia. Na sequência seguem listados todos os 15 parâmetros do SWAT com importância direta no escoamento superficial e no balanço hídrico da BHRI, bem como suas respectivas descrições e finalidades no modelo:

Nº. Variável/Parâmetro: Significado ou função na modelagem hidrológica com o SWAT

1. r-CN2.mgt: A Curva Número 2 (CN2) é uma função que descreve a permeabilidade do solo, uso da terra, tipo de solo, e condições antecedentes da água do solo, neste caso o estágio inicial do escoamento. É apropriado para casos de declividade a 5%.
2. v-ALPHA_BF.gw: O ALPHA_BF é o fator do fluxo de base (dias), uma constante de recessão do fluxo de base que permite projetar a influência do fluxo de água subterrânea nas mudanças da recarga.

3. v-GW_DELAY.gw: Tempo entre os fluxos da água subterrânea (dias), das zonas superficiais, vadosas, passando pelas zonas mais profundas do perfil do aquífero raso, até esta água retornar ao curso d'água superficial.
4. v-GWQMN.gw: Profundidade limiar da água no aquífero raso exigido para ocorrer o fluxo de retorno (mm), o fluxo de retorno somente ocorrerá caso a lamina do aquífero raso for maior ou igual GWQMN.
5. v-GW_REVAP.gw: Corresponde ao coeficiente que permite o cômputo da água que é retirada da superfície por espécies arbóreas de raízes profundas ou mesmo a perda de água do solo por evaporação.
6. v-RCHRG_DP.gw: Corresponde a fração de água de percolação do aquífero profundo que é responsável por recarrega o aquífero.
7. r-SOL_BD(1).sol: Correspondo a densidade do solo em camadas e profundidades variáveis.
8. v-REVAPMN.gw: Corresponde a profundidade limiar da água no aquífero raso para “revap” ou percolação para o aquífero profundo para ocorrer (mm H₂O).
9. r-SOL_AWC(..).sol: É a capacidade do campo em armazenar água disponível nas camadas de solo (mm H₂O / mm de solo).
10. r-SOL_K(..).sol: É a condutividade hidráulica saturada (mm / h), K_{sat}, e relaciona a taxa de fluxo de água do solo ao gradiente hidráulico, é uma medida da facilidade de movimento da água através do solo.
11. r-ESCO.hru: É o fator de compensação de evaporação do solo, permite que o usuário modifique a distribuição da profundidade usada para atender à demanda evaporativa do solo, para levar em conta o efeito da ação capilar, crostas e rachaduras.
12. r-OV_N.hru: É o coeficiente de Manning para o escoamento superficial, é um valor tabelado e requerido.
13. r-SLSUBBSN.hru: É o comprimento médio do declive (m), ou seja, a distância que o fluxo escoar pela vertente no processo dominante de escoamento superficial.

14. v-CH N2.rte: É o valor do coeficiente de Manning para o canal principal.
15. r-HRU SLP.hru: Inclinação média da vertente (m/m). O GIS atribuirá um valor à essa variável para todas as HRU's numa mesma sub-bacia. Porém é possível ao usuário variar o valor desse parâmetro por tipo de solo e cobertura.

Após o ajuste dos parâmetros os mesmos foram inseridos manualmente na base de dados do SWAT e logo após procedeu-se a tentativa de validação. Segundo Arnold *et al.* (2012) para validar o modelo é necessário que o modelo esteja calibrado, então deve-se tomar um conjunto de dados diferente dos que foram utilizados para calibrar, podendo ser de uma sub-bacia integrante da bacia para qual o modelo foi calibrado, e aplicar o modelo para o intervalo de tempo do conjunto de dados. Havendo sido efetuado desta forma, deve-se comparar as saídas do modelo aos dados que foram selecionados e avaliar o grau de convergência destes dados, desta forma é possível dizer se o modelo é ou não capaz de gerar saídas satisfatórias.

3.9 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E EFICIÊNCIA DO MODELO

É necessário avaliar a qualidade e a eficiência do modelo em fornecer resultados os mais precisos possíveis, com acurácia das suas saídas e que o modelo seja eficiente em replicar com os mesmos requisitos novas simulações para aquele mesmo fenômeno ou ambiente. Os indicadores de eficiência do ajuste e da qualidade dos resultados, utilizados para avaliar as saídas do SWAT neste trabalho serão coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o Percent BIAS (PBIAS) descrito em (Moriasi *et al.*, 2007) e o coeficiente de determinação (R^2).

Segundo Moriasi *et al.* (2007), o objetivo do NSE (Equação 3) é apontar como está se comportando o ajuste dos valores simulados aos valores reais, por meio da razão entre a variância dos valores relativos simulados e a variância dos valores observados. Para tanto a equação faz o valor do NSE oscilar de $-\infty$ a 1, quanto mais próximo de 1 for o NSE melhor será a qualidade do ajuste dos dados e por consequência do modelo. O NSE cujo valor oscila nas seguintes faixas: 0,75 a 1, 0,65 a 0,75, 0,5 a 0,65, e $<0,5$ se enquadram nas seguintes qualificações respectivamente: muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório, respectivamente.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs} - X_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{obs} - \bar{X})^2} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

Com o Percent BIAS (Equação 4) é possível apontar as tendências observadas nos resultados das simulações, estes podem estar superestimando ou subestimando a tendência real. O PBIAS oscila entre valores positivos e negativos, quanto mais próximo de zero, menor o afastamento do valor simulado do real, logo mais preciso será o modelo e melhor o seu desempenho. Quando o valor do PBIAS é respectivamente: $< \pm 10\%$, $\pm 10\% - \pm 15\%$, $\pm 15\% - \pm 25\%$, e $\geq \pm 25\%$, o modelo será qualificado como muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório, respectivamente (Moriassi *et al.*, 2007).

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs} - X_{sim})}{\sum_{i=1}^N X_{obs}} \right) * 100 \quad (Equação 10)$$

em que para as equações 9 e 10: X_{obs} - são os dados das vazões observadas, X_{sim} - são os dados de vazões simuladas, $\bar{X}$ - é média dos dados de vazões observadas, por fim e N é o número total de dados observados.

O R^2 é o coeficiente de determinação, ele consiste de um ajuste linear simples à um dado modelo matemático ou estatístico. Variando de 0 até 1, quanto mais próximo de 1 estiver é melhor a eficiência do modelo em representar sistema observado.

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (Equação 11)$$

em que: y_i é o valor observado, $\bar{y}_i$ é a média dos valores observados.

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (Equação 12)$$

em que: $\hat{y}$ é o valor simulado e y_i é o valor observado.

Da soma, dos somatórios dos quadrados da diferença, entre os valores observados e a média, e entre os valores simulados e valores observados, somatório dos resíduos, tem-se a Equação 7.

$$SQ_{tot} = SQ_{exp} + SQ_{res} \quad (Equação 13)$$

Normalizando a Equação 7, obtém-se a equação R^2

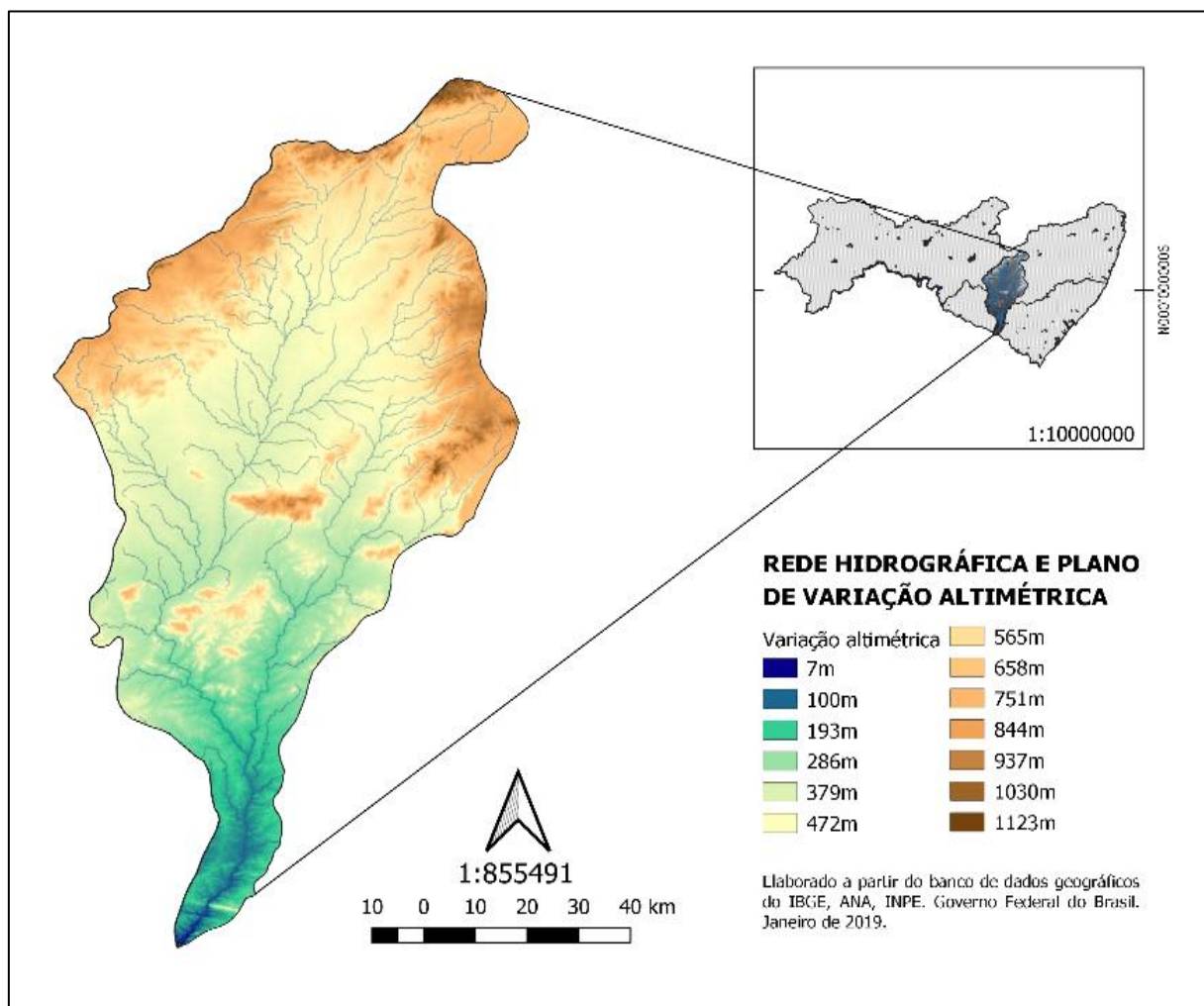
$$R^2 = \frac{SQ_{exp}}{SQ_{tot}} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad (Equação 14)$$

4 ANÁLISES DOS RESULTADOS

4.1 PRODUTOS EXTRAIDOS DO MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO DA BHRI

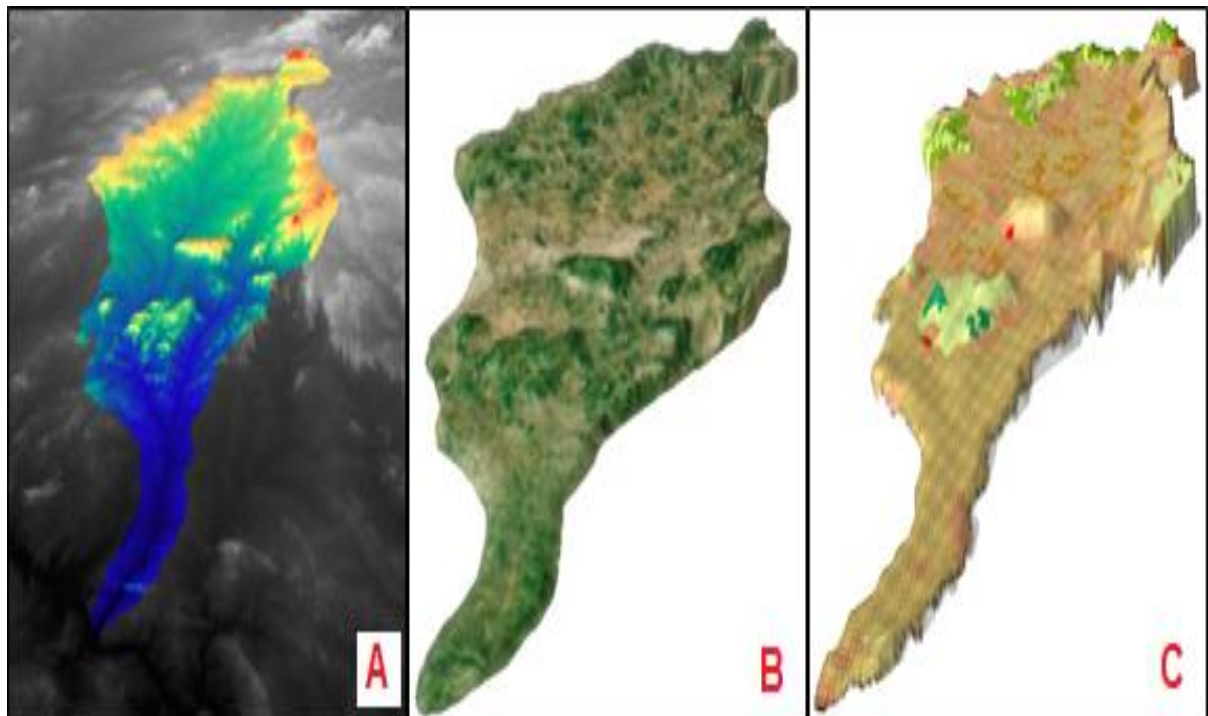
Do processamento planialtimétrico resultou o MDE da BHRI que foi utilizado no QSWAT para a simulação do terreno, além do mapa na Figura 10, onde é observada a malha hidrográfica sobreposta à um plano de altimetria. O mapa apresenta uma variação altimétrica entre 7 e 1123 m. Os tons marrons escuro correspondem aos pontos de maior altitude, logo, o posicionamento dos divisores de águas e de onde partem os principais cursos d'água. Na Figura 11 são apresentadas outras aplicações para o MDE por meio da sobreposição de diversos dados cartográficos com o MDE.

Figura 10 - Carta da Rede de Drenagem e Plano de Altimetria da BHRI.



Fonte: Própria Autoria, 2019.

Figura 11 - Aplicações diversas para o MDE.



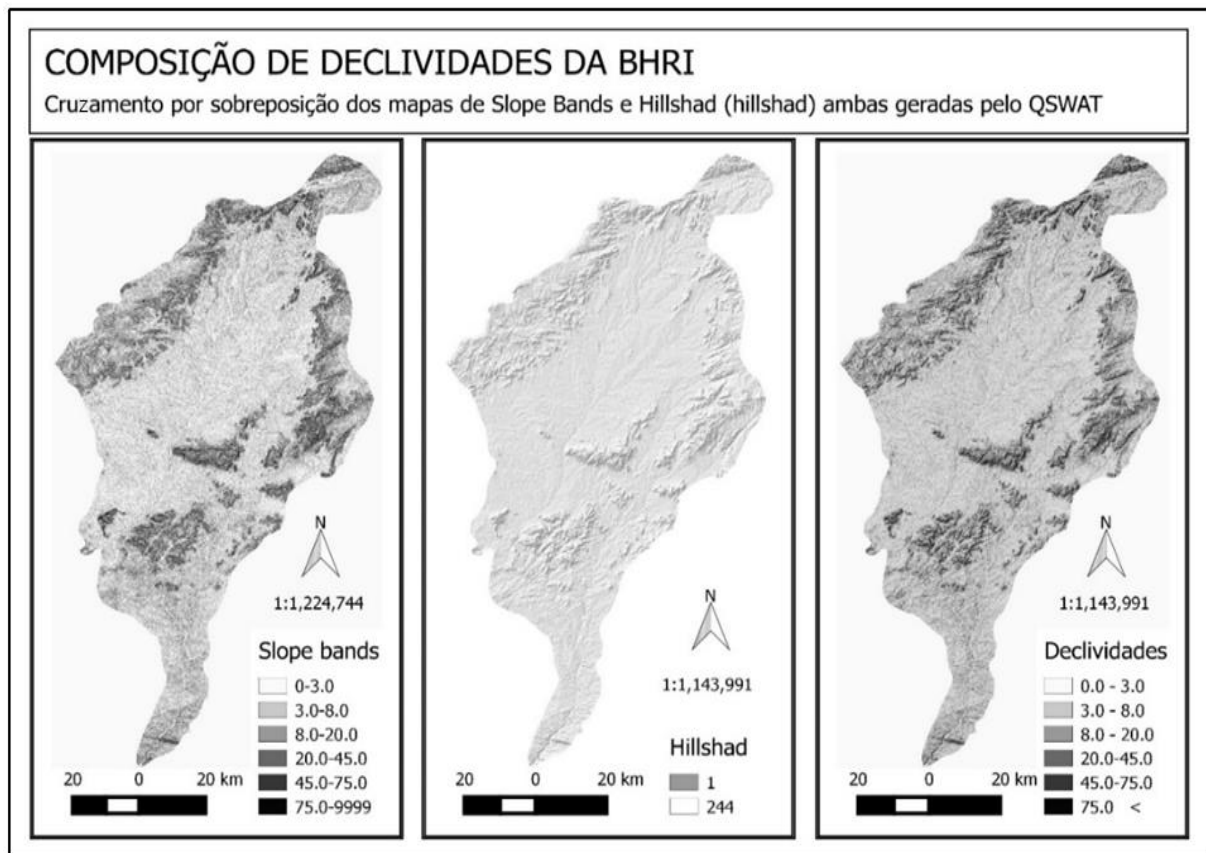
A - Plano tridimensional da área da BHRI. **B** - Sobreposição de imagens de satélite. **C** - Sobreposição de carta de cobertura e uso do solo.

Fonte: Própria autoria, 2019.

Na Figura 11 – C, é possível por exemplo confrontar dados de relevo com a distribuição da vegetação por meio da carta de cobertura e uso do solo, observando as imagens A e B da mesma figura, é possível observar algumas características como, por exemplo, os topos de morro, que são as áreas de maior densidade de cobertura vegetal no interior da bacia, provavelmente cobertos por vegetação de grande porte.

Um outro produto que pode ser gerado a partir do processamento do MDE é a carta de declividades do terreno. O modelo realizou a extração do dado *slope bands* com base na segmentação de declividades informada que foi previamente estudada pela EMBRAPA (Brasil, 1979). Além do dado de *slope bands*, no momento de caracterização da bacia hidrográfica o modelo gerou outros dados do terreno que apresentam características do relevo da bacia, um destes dados é a carta *hillshad* (colinas), que é representação do terreno em um espaço tridimensional com destaque para os acidentes topográficos. Da sobreposição do dado *slope bands* e *hillshad*, foi gerada uma composição (Figura 12) para a carta de declividades onde se pode observar detalhadamente as variações superficiais do terreno.

Figura 12 - Composição da carta de declividade do terreno



Fonte: Própria autoria, 2020.

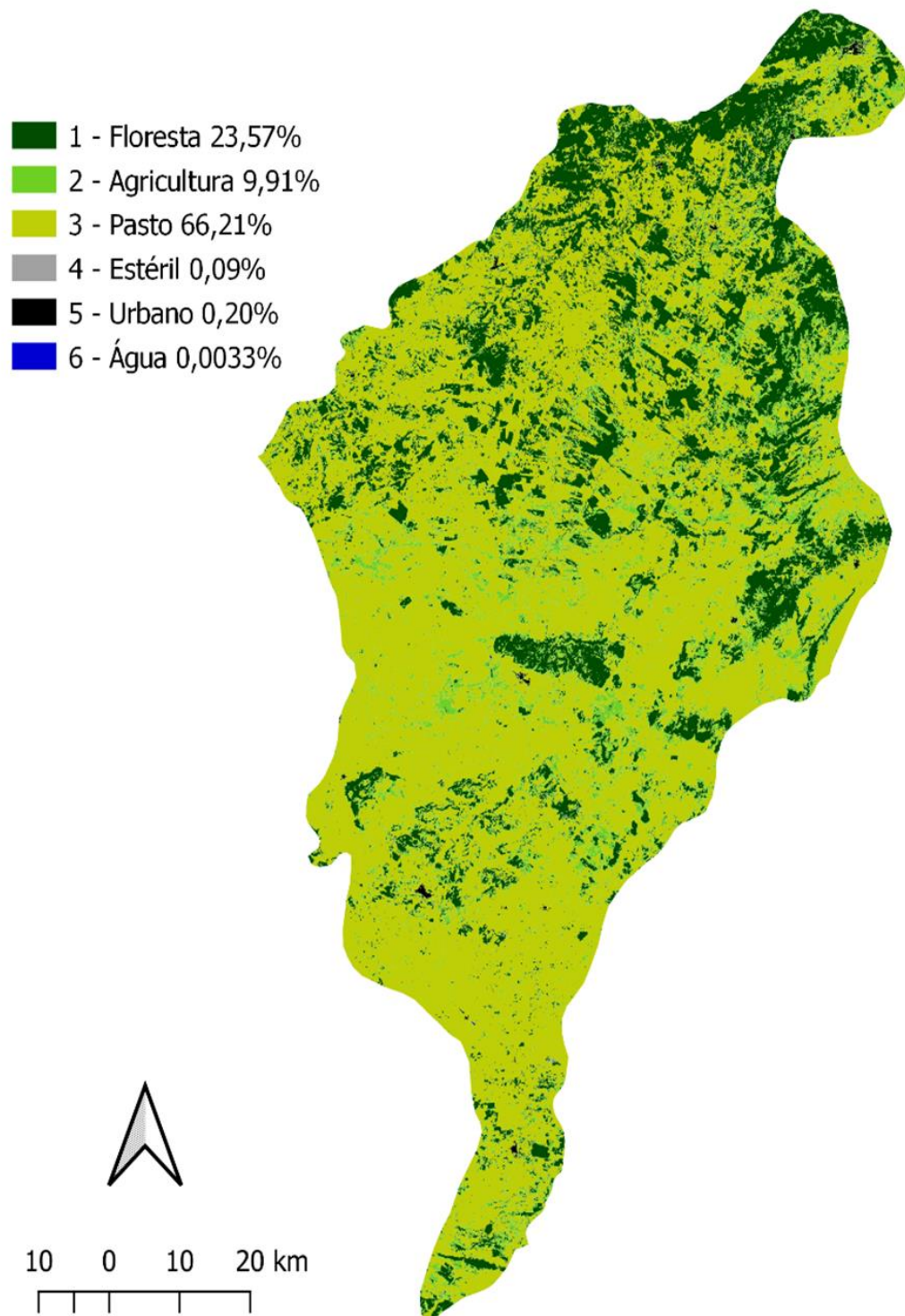
4.2 COBERTURA E USO DO SOLO

Conforme dados apresentados pelo Projeto MapBiomias em 2019, o bioma Caatinga apresenta uma área próxima de 844,4 mil km², equivalente a 9,92% do território nacional, com menos de 50% da cobertura original de floresta lenhosa decídua convertida, sendo a parte antropizada destinada principalmente para agricultura, pecuária, pecuária de pequeno porte e urbanização. Em comparação a área integral da Caatinga, 23,57% do território da BHRI estão cobertos por matas da Caatinga (Figura 13), 9,91% estão convertidos em áreas agrícolas, 0,09% são considerados terrenos estéreis, 0,20% convertidos em malha urbana e o mais alarmante, 66,21% do território da BHRI foi convertido em pastagem. Estes dados foram extraídos do raster de cobertura e uso do solo da BHRI que foi elaborado a partir do recorte ao raster do MAPBIOMAS 2011.

Grande parte da vegetação natural da bacia foi substituída por pastos e campos para provimento de atividade como a pecuária extensiva, a agricultura familiar e a fornecimento de lenha para a indústria (SOUSA, VIANA *et al.*, 2018). Estas matas derrubadas para abrir espaço

para os negócios do homem, abrangem em sua totalidade áreas planas, de menor elevação e maior proximidade aos corpos d'água.

Figura 13 - Taxas percentuais por tipo de cobertura no ano de 2011



Fonte: Própria autoria, 2020.

Segundo Kuwajima (2012), a vegetação é fundamental para a continuidade dos processos hidrológicos, tanto em termos quantitativos quanto em termos qualitativos, sua preservação constitui fator indispensável para a preservação e manutenção de uma bacia hidrográfica. A vegetação além de contribuir para a manutenção dos processos hidrológicos contribui decisivamente para a conservação do solo e para a redução dos processos erosivos que impactam aos rios, reservatórios e a economia em função dos danos a produção agrícola.

Para Cruz *et al.* (2013), o desmatamento é fator de elevação do escoamento superficial, aumento da produção de sedimentos, perda de solo, danos a produtividade e assoreamento das calhas de rios. O manejo integrado seria então a melhor solução para a gestão de bacias, porém esse manejo requer conhecimento dos processos que envolvem o escoamento superficial, o transporte de sedimentos em função da erosão e as relações destes fatores com os eventos climáticos e as precipitações. Em seu estudo Cruz *et al.* (2013), avaliou a calibração e a análise de sensibilidade do modelo SWAT, durante o processo de modelagem de duas sub-bacias do Rio Japaratuba localizadas no Estado de sergipe em Sergipe.

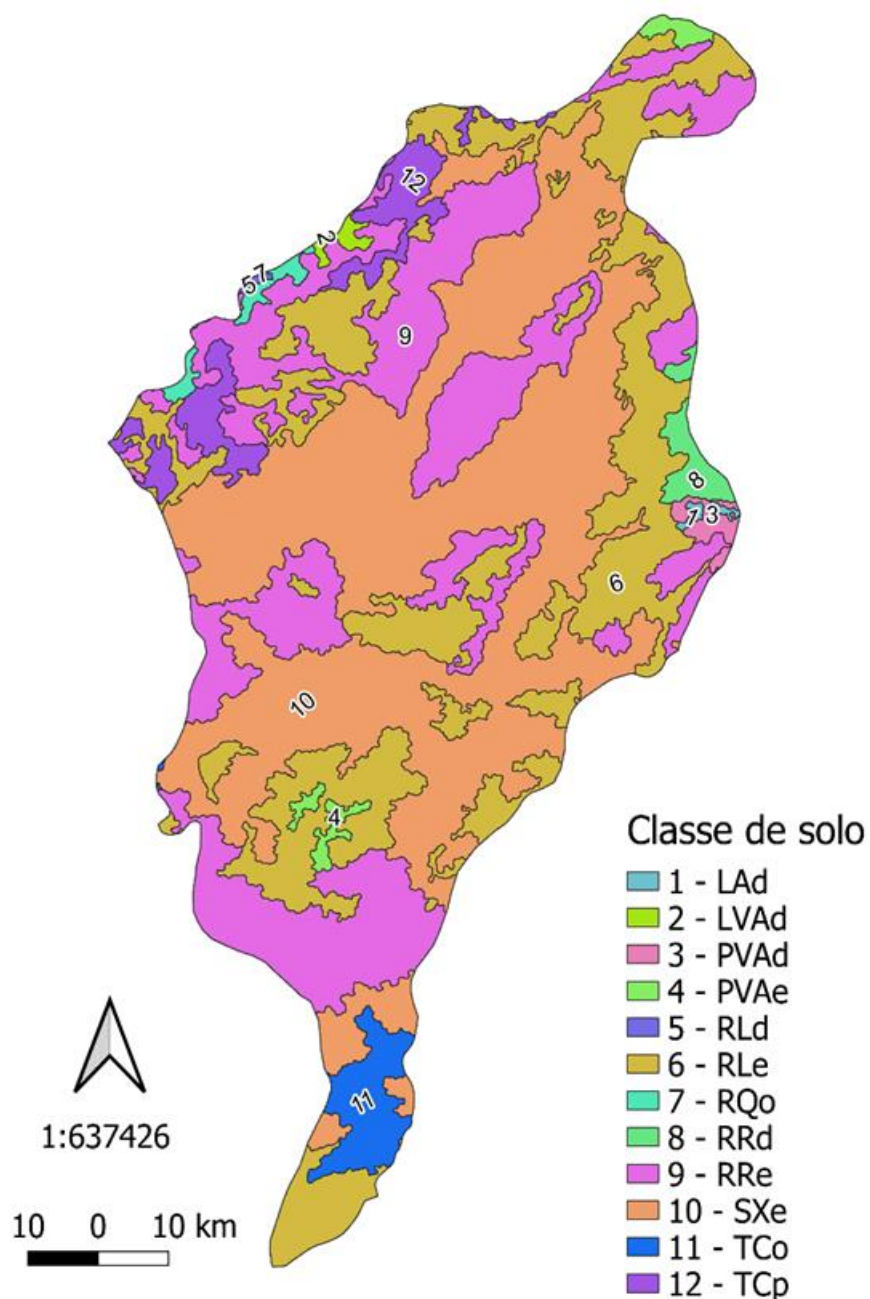
4.3 LEVANTAMENTO PEDOLÓGICO

A distribuição dos tipos de solo está representada na Figura 14. Foram identificados doze tipos de solos para região e suas respectivas frações contribuintes para a pedologia da bacia:

- 1 - Latossolo Amarelo Distrófico (LAd – 0,14%)
- 2 - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd – 0,27%)
- 3 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd – 0,55%)
- 4 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (PVAe – 0,85%)
- 5 - Neossolo Litólico Distrófico (RLd – 0,06%)
- 6 - Neossolo Litólico Eutrófico (RLe – 24,84%)
- 7 - Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo – 0,55%)
- 8 - Neossolo Regolítico Distrófico (RRd – 1,03%)
- 9 - Neossolo Regolítico Eutrófico (RRe – 25,21%)
- 10 - Planossolo Háptico Eutrófico (SXe – 40,70%)
- 11 - Luvisso Crômico Órtico (TCO – 2,30%)
- 12 - Luvisso Crômico Pálico (TCp – 3,49%)

Os solos predominantes são o Planossolo Háplico Eutrófico ocupando 40,7% da área da bacia, em sequência estão o Neossolo Regolítico Eutrófico ocupando 25,21% da área e o Neossolo Litólico Eutrófico ocupando 24,84% da área. Esta configuração de distribuição de solos na bacia do Rio Ipanema terá fundamental importância na etapa de análise dos dados de saída do modelo, pois servirá de base para a interpretação dos resultados tendo em vista que cada tipo de solo apresenta características hidrodinâmicas em particular.

Figura 14 - Tipos de solo.



Fonte: Própria autoria - 2019.

Planossolos:

Esta caracterização foi realizada em conformidade com o manual técnico de pedologia do IBGE 3ª edição (2015). Os resultados obtidos nos evidenciam que em geral os planossolos são solos com composição mineral acentuada, imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte eluvial, textura leve diretamente contrastante com horizonte B imediatamente subjacente, bem adensados com elevadas concentrações de argila, possuem permeabilidade lenta ou muito lenta, constituindo por vezes um horizonte “pã”, responsável pela detenção e sobreposição do lençol d’água, variando a sua existência/presença em períodos do ano.

Os planossolos podem apresentar quaisquer configurações de horizontes superficiais ou subsuperficiais, sendo uma de suas características a alteração brusca de textura entre estes horizontes como, por exemplo, as seguintes configurações conforme apresentadas no manual de pedologia do IBGE (2015, p. 311-312): “horizonte A, horizonte E, nem sempre horizonte E alábico, seguidos de horizonte B plânico, tendo sequência de horizontes A, AB, ou A, E (álábico ou não) ou Eg, seguidos de Bt, Btg, Btm ou Btmg”. Apresentam variações da fertilidade natural, da textura, estrutura, porosidade, permeabilidade e cores entre os horizontes A e/ou E e o B. Ocorrem expressivamente nordeste brasileiro, com predominância nátrica do norte da Bahia até o Ceará, no Pantanal Mato-Grossense, e no Rio Grande do Sul. Estes solos são explorados na produção de arroz e como pastagens para pecuária de grande e pequeno porte.

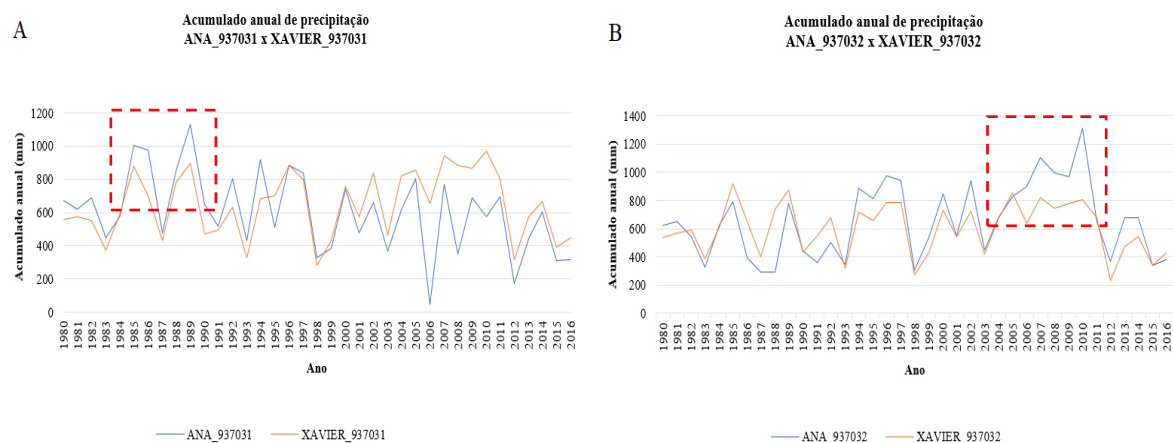
Neossolos:

Esta caracterização foi realizada em conformidade com o manual técnico de pedologia do IBGE 3ª edição (2015). Os resultados demonstram que são solos constituídos de uma mescla de material mineral e orgânico de pouca espessura, apresentando aproximadamente 30 cm de profundidade. Não apresentam horizonte B; em geral não apresentam horizonte glei; não apresentam horizonte vértico imediatamente posterior ao horizonte A; não apresentam horizonte plíntico posterior aos horizontes A, E ou quando precedidos de horizontes de coloração pálida variando nas matrizes 2,5Y, 5Y, ou 10YR a 7,5YR; não apresentam horizonte chernozêmico conjugado ao cálcico ou C carbonático. Abrangem os solos rasos, no caso dos neossolos litólicos; ou profundos e arenosos, no caso dos neossolos quartzarenicos. Apresentam minerais primários de fácil intemperização, no caso dos neossolos regolíticos; ou formado por deposições sucessivas de camadas aluvionares, nos casos do neossolos flúvicos.

4.4 LEVANTAMENTO HIDROCLIMÁTICO

Os dados sintéticos gerados por Xavier (2019) e que foram comparados com os dados de precipitações levantados de estações cadastradas no HidroWeb, apresentaram comportamento convergente entre os dados sintéticos e os reais, além de maior uniformidade em sua distribuição temporal como é possível notar nos gráficos da Figura 15, ambos cobrindo um período de 37 anos (jan/1980 a dez/2016).

Figura 15 - Gráficos comparativos entre séries históricas de precipitações reais e as séries sintéticas geradas por Xavier para as mesmas coordenadas e estações.



Fonte: Própria autoria, 2019

Existe correlação de comportamento entre as estações 937031 e 937032, o acumulado mínimo anual oscila em torno dos 200 mm.ano^{-1} e o máximo oscila em torno 1200 mm.ano^{-1} , porém comparando a distribuição temporal entre os maiores picos o comportamento é um pouco mais distinto e inverso, o que é um fato estranho tendo em vista que se trata de duas estações relativamente próximas uma da outra. É possível observar que no período compreendido entre 1980 a 2000, a estação 937031 registrou precipitações acima dos 1000 mm.ano^{-1} , enquanto que a estação 937032, registrou precipitações, na maior parte do tempo entre os 600 e 800 mm.ano^{-1} , no período de 2000 a 2016 ocorre justamente o inverso. Apesar de estarem em uma área relativamente pequena, em comparação a outros conjuntos de estações de monitoramento climático, a leitura dos dados destas estações para o mesmo período não apresenta boa correlação pois, minimamente apresenta uma diferença de próxima dos 500 mm.ano^{-1} .

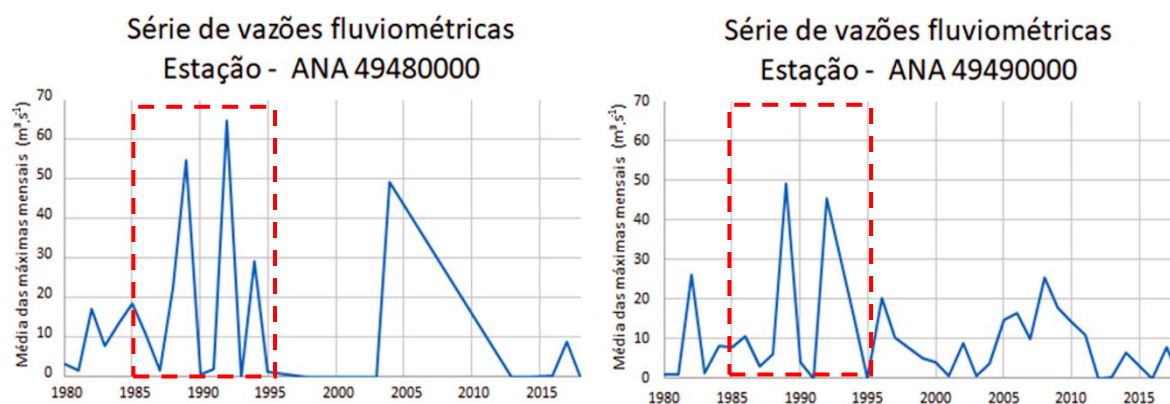
Em relação aos dados de vazões os reflexos do aporte hídrico provocados pelas precipitações e principalmente pelos picos de precipitações são mais coerentes em relação a

distribuição e uniformidade temporal, porém a qualidade dos dados também não é boa. Observe (Figura 16) que a estação fluviométrica 49480000 está instalada vizinha à estação pluviométrica 937031, e a estação fluviométrica 49490000 está instalada vizinha a estação pluviométrica 937032 (esta estação está nomeada neste trabalho como HWC_937032 e foi excluída do conjunto por estar na mesma posição da estação situada no ponto exutório da sub-bacia delimitada no modelo no QSWAT).

É notável que em um mesmo período houve três picos de afluência em função de aportes significativos de água oriundos de precipitações acima da média entre os anos de 1985 e 1995. Pelos gráficos é possível notar também o comportamento coerente e esperado no decaimento ou amortecimento destas ondas de cheias, pelo menos neste trecho do hidrograma os dados estão bastante coerentes. Contudo quando os dados foram analisados anteriormente apresentaram muitas falhas e descontinuidades nas séries históricas, isto pode ser percebido observando os vales formados nos gráficos das duas estações supracitadas.

Conforme dito anteriormente estes dados passaram por análise de consistência e os dados de vazões aferidos a partir da estação 49490000 foram utilizados para a calibração e validação do modelo por apresentar melhor continuidade no tempo, enquanto que os dados da estação 49480000 possuíam enormes lapsos temporais sem registros de leitura inviabilizando a sua utilização. O quadro exposto gerou grande desafio à execução do trabalho haja visto a necessidade dos dados para viabilizar a modelagem e gerar um resultado minimamente confiável pelas simulações.

Figura 16 – Séries históricas de vazões em duas estações fluviométricas da ANA em operação na BHRI.



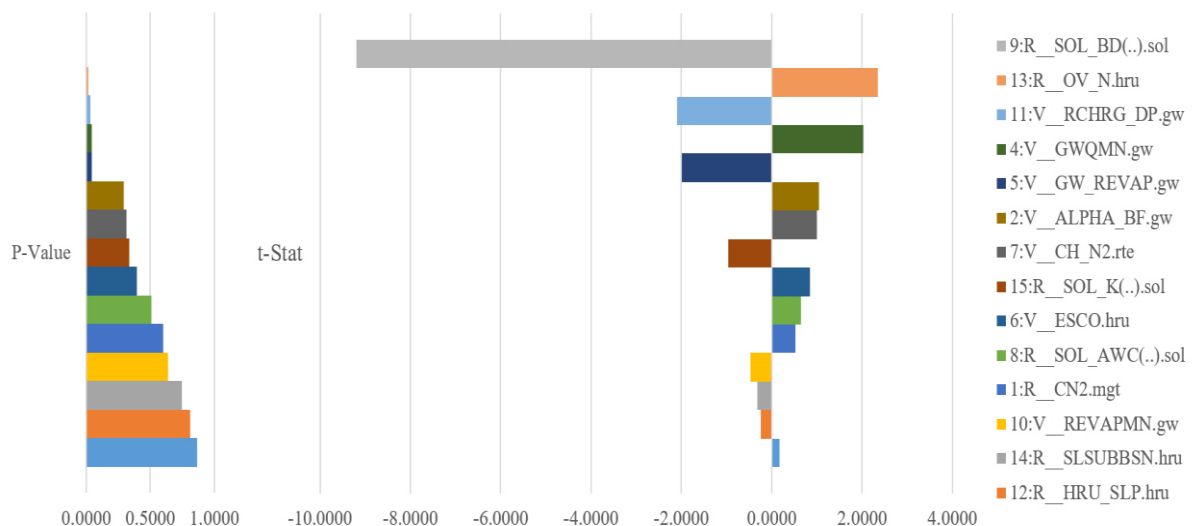
Fonte: Própria autoria, 2019

4.5 ANÁLISE SENSIBILIDADE, INDICADORES DE QUALIDADE E CALIBRAÇÃO DO MODELO

No procedimento de ajuste dos parâmetros do modelo foi necessário aplicar a calibração do SWAT-CUP dez vezes: seis vezes com trinta repetições por iteração, quando os resultados começaram a se definir com o NSE passando de 0.5 e em direção à coeficientes de ajuste minimamente desejáveis, foram repetidas mais quatro vezes com quinhentas repetições cada, mas o NSE se estabilizou em 0.61 e o PBIAS em -8.5. Quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste do NSE, porém conforme foi descrito anteriormente um NSE em 0,61 é uma classificação satisfatória. O PBIAS apresenta dois significados importantes, que são possíveis inferir do ajuste em -8.5, um dele é que os valores se encontram afastados do ideal, e a simulação não foi adequada, e outra informação que vem pela análise do sinal é a de que o modelo está superestimando os seus resultados.

Na última rodada dos quinze parâmetros elencados (Figura 17), cinco se mostraram mais sensíveis ao modelo, foram eles: R_SOL_BD.sol, R_OV_N.hru, V_RCHRG_DP.gw, GWQMN.gw e V_GWREVAP.gw (Tabela 4). Praticamente todos os parâmetros sensíveis, com exceção do coeficiente de Manning (OV_N), descrevem algum estágio ou comportamento da água em interface com o escoamento subsuperficial e se correlacionam diretamente com a características topológicas e pedológicas da bacia, como por exemplo a formação de horizontes pã e a retenção do lençol freático em determinados períodos do ano.

Figura 17 – Gráfico dos fatores P-Value e T-Stat relacionado à determinação da sensibilidade global dos parâmetros processados pelo SWAT-CUP 2012 ao modelo.



Fonte: Própria autoria, 2020

Foi visto anteriormente na caracterização dos solos da BHRI que uma das características dos planossolos é a presença de horizonte eluvial textura leve e suave contrastando com um horizonte B bastante adensado e rico em argila de baixa permeabilidade. E que nestas condições forma-se uma camada de solo denominada horizonte pã, que impede, ou detém, o fluxo hídrico profundo e sobrepõe o lençol d'água em níveis mais elevados em alguns períodos do ano. Este fenômeno pedológico está diretamente relacionado ao Sol_{BD} (*Soil Bulk Density*) ou densidade do solo, ao range de variação da fração de água que percola no sentido do aquífero profundo, que neste trabalho é simulada por meio do parâmetro RCHRG_DP, e por fim o GWQMN que significa a profundidade máxima a que deve estar o aquífero raso para que haja fluxo de retorno para alimentar a calha do rio.

Aparentemente a densidade desta camada intermediária de solo no horizonte B pode constituir um fator decisivo até mesmo para a duração e distribuição das vazões no canal principal do Rio Ipanema, haja visto que, dadas as características climáticas e pedológicas, a retenção periódica do lençol freático em baixas profundidades, ou seja, mais próximo a superfície, eleva o potencial de perda de água para a atmosfera e mesmo o escoamento no canal reduzindo o tempo de concentração, justificando os picos de vazões e respostas rápidas à fortes precipitações, o rápido deplecionamento da bacia e a entrada em recessão hídrica. Por este motivo o modelo também apresentou uma acentuada sensibilidade ao parâmetro GW_REVAP e ao coeficiente de Manning (OV_N). Outro ponto que chama atenção e favorece estas hipóteses é o fato de que maior parte da cobertura vegetal da bacia foi alterada para pastagens. Os solos de pastagens geralmente são altamente impactados pelo pisoteio favorecendo a baixa infiltração e acelerando o escoamento superficial e a evaporação direta da água na interface solo-atmosfera.

Tabela 4 - Parâmetros calibrados ordenados por grau de sensibilidade apresentada no modelo da BHRI.

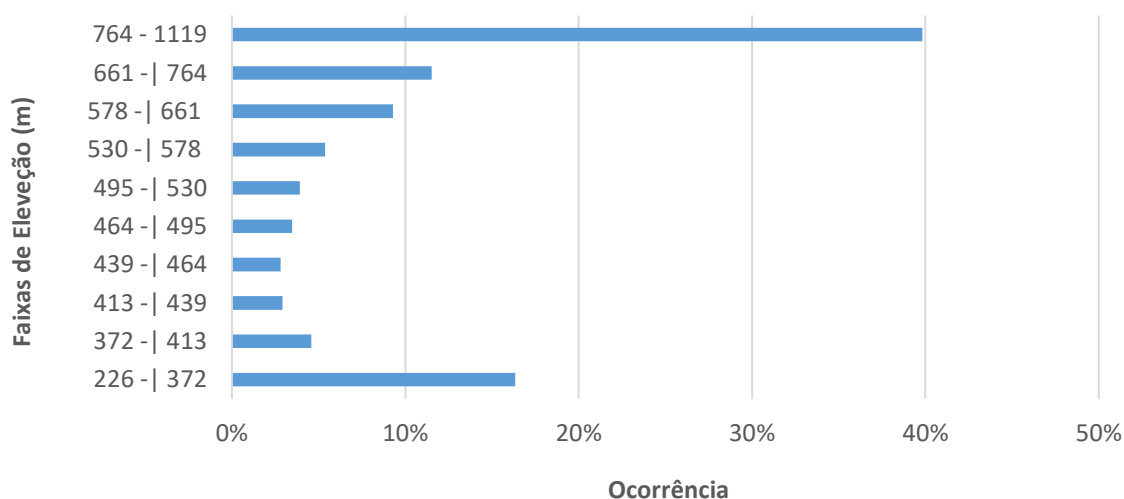
Parâmetro	Min Inicial	Valor Ajustado	Max Inicial	P-Value
► R_SOL_BD(1).sol	-0.50	-0.09	0.60	0.00
► R_OV_N.hru	-0.20	0.13	0.20	0.02
► V_RCHRG_DP.gw	0.80	0.92	1.00	0.04
► V_GWQMN.gw	4000	5546	5000	0.04
► V_GW_REVAP.gw	0.15	0.17	0.20	0.05
V_ALPHA_BF.gw	0.00	0.00	0.01	0.30
V_CH_N2.rte	0.00	0.44	0.30	0.31
R_SOL_K(1).sol	-0.20	-0.18	0.20	0.34
V_ESCO.hru	0.01	0.02	0.02	0.40
R_SOL_AWC(1).sol	0.20	0.27	0.40	0.51
R_CN2.mgt	-0.80	-0.90	0.20	0.60
V_REVAPMN.gw	0.00	0.10	0.10	0.64
R_SLSUBBSN.hru	0.00	0.15	0.20	0.75
R_HRU_SLP.hru	0.00	0.12	0.20	0.81
V_GW_DELAY.gw	0.00	0.15	2.00	0.87

Fonte: Própria autoria, 2020

4.6 RELATÓRIOS E SIMULAÇÕES GERADOS PELO QSWAT

Do modelo inicialmente foram gerados três relatórios: *TopoReport - Elevation report for the watershed*; *ReportSwat - Landuses, Soil and Slope*; *ReportSwat – Unidade de Resposta Hidrológica*. No TopoReport encontram-se as estatísticas de elevações do terreno segmentados metro a metro a partir das quais é possível ter dimensão das faixas de elevações e dos percentuais de áreas da bacia distribuídas nestas faixas de elevações. Conforme já havia sido constatado por meio da análise das cartas de elevações, foram evidenciadas elevações a partir de 7m e superiores aos 1120m para toda a bacia. O gráfico da Figura 18, refere-se à área da sub-bacia que foi delimitada pelo SWAT com base no ponto de exutório demarcado.

Figura 18 - Distribuição percentual das áreas da bacia por faixa de elevação em metros



Fonte: Própria autoria, 2020

Mais de 70% do território da bacia encontra-se em altitudes superiores aos 500m partindo dos pontos mais elevados próximos as nascentes do Rio Ipanema no estado de Pernambuco em direção depressão e calha do Rio São Francisco. Neste espaço delimitado, o modelo segmentou elevações variando a partir de 226m até aproximadamente 1119m um delta de aproximadamente 893m, fator contributivo para os cálculos da declividade equivalente (I_{eq}), $\pm 0.00205 \text{ m.m}^{-1}$, do tempo de concentração (T_c), $\pm 38\text{h}$, e velocidade média de escoamento (V_m), $\pm 1.26 \text{ m.s}^{-1}$. Do modelo também foi possível obter dados para os cálculos do coeficiente de compacidade (K_c), fator de forma (K_f), e do índice de conformação (I_c), respectivamente 2.4, 0,32, 0.30, estas informações são geradas a partir de dados de proporcionalidade dimensional da bacia, com operações que relacionam comprimento, largura, perímetro e área da bacia. As

características físicas da bacia (I_{eq} , T_c , V_m , K_c , K_f , I_c) estão diretamente relacionadas as tendências de ocorrência de enchentes e inundações ao longo da bacia, tendências estas que se apresentam baixíssimas para o trecho do Rio Ipanema na sub-bacia delimitada. Todas as informações e supracitadas foram obtidas com base em dados de saída do SWAT, como por exemplo as declividades e comprimentos dos trechos do canal principal do Rio Ipanema.

Dos demais relatórios gerados pelo SWAT é possível extrair informações da configuração natural da bacia hidrográfica e das HRU's discretizadas pelo modelo. As Tabelas 5-A, 5-B, e 5-C, trazem respectivamente a discretização da área da bacia em frações e percentuais por tipo de solo, cobertura e declividade. A partir dos relatórios confirmamos as análises visuais das informações cartográficas quanto aos tipos de solos predominantes, quanto aos tipos de cobertura e uso do solo mais observadas e do grau de declividade da área da bacia.

Tabela 5 - Tabelas de distribuição dos percentuais de áreas relativas geradas pelo SWAT e disponibilizadas por meio de relatórios.

A - Tipo de solo			B - Tipo de cobertura			C - Grau de declividade		
Soil	Área (km ²)	%	Landuses	Área (km ²)	%	Slope	Área (km ²)	%
LVAAd	15.2667	0%	WATR	0.1359	0%	0-3.0	1423.8488	30%
PVAe	34.9248	1%	FRST	1,308.52	28%	3.0-8.0	1902.681	40%
RLd	0.4077	0%	PAST	2962.8656	63%	8.0-20.0	887.8462	19%
RLe	943.5953	20%	AGRL	428.0168	9%	20.0-45.0	412.4385	9%
RQo	31.8411	1%	URBN	11.2393	0%	45.0-75.0	75.9305	2%
RRd	15.5187	0%	BARR	4.0131	0%	75.0-9999	11.8521	0%
RRe	1303.3431	28%	Totais	4714.5971	100%	Totais	4714.5971	100%
SXe	2116.5333	45%						
TCp	253.1666	5%						
Totais	4714.5973	100%						

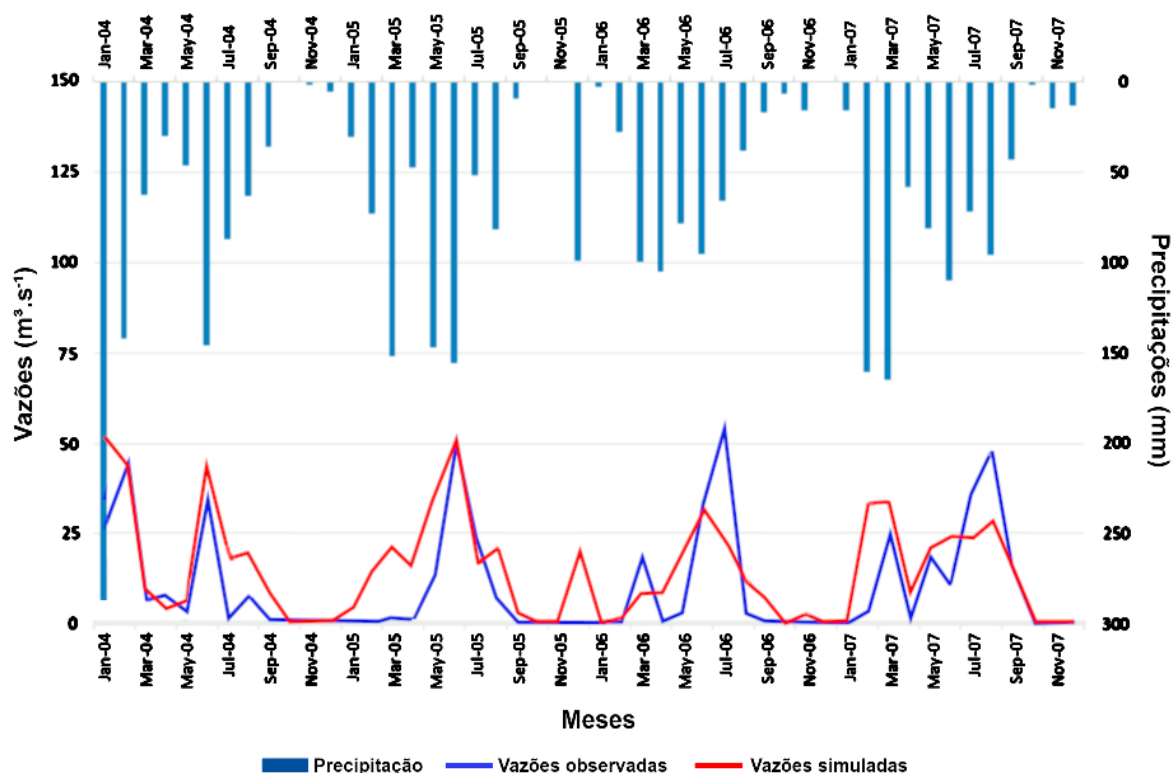
Fonte: Própria autoria, 2020

A bacia do Rio Ipanema em sua totalidade apresenta uma conformação alongada com uma área proporcional à de um círculo próxima as cabeceiras na parte superior da bacia e onde estão localizadas as maiores elevações e partir da metade do seu trecho ela se torna afunilada e delgada, apresentando um estreitamento do vale entre os divisores de água. É conveniente observar que os tempos de concentração nestas regiões distintas da bacia podem variar em função da forma e do grau de declividade, e consequentemente a velocidade de escoamento também pode sofrer variações bruscas, das regiões de cabeceira para o exutório final no Rio São Francisco. Tendo observado esta característica da conformação da bacia, é razoável imaginar que em situações de precipitações extremas com níveis de afluência

elevados, quanto mais próximo do exutório final ou a partir da metade da linha axial da bacia maiores os efeitos das ondas de cheias.

O comportamento provável do escoamento superficial na bacia, justifica a o hidrograma da Figura 19. A pesar das baixas vazões, hidrograma apresenta um gráfico muito acidentado com picos de vazões conforme a ocorrência dos picos de precipitações. As vazões oscilam de 0,0 para cerca de $50,0 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Cabe notar que conforme apresentado pelo indicador PBIAS de valor -8,5, a vazão simulada permanece maior parte do tempo superestimada em relação a vazão observada, e mais coerente com os valores de precipitações alimentados no modelo. Pelo hidrograma também fica perceptível o motivo para o ajuste mediando demonstrado pelo NSE de valor 0,61, tendo em vista o fato de que o modelo não conseguiu simular perfeitamente o fluxo hídrico na bacia.

Figura 19 – Vazões simuladas ajustadas as vazões observadas versus precipitações



Fonte: Própria autoria, 2020

O resultado das simulações é o resultado da iteração das diversas variáveis e parâmetros ocorrentes na bacia, por exemplo disponibilidade de um bom banco de dados de solo para a bacia, monitoramento adequado do clima e das variáveis hidrológicas, monitoramento das alterações de cobertura e uso. A maior dificuldade observada nesta

modelagem foi a obtenção dos dados de solo e as medições de vazões, a ausência de dados robustos gerou enormes dificuldades para o trabalho.

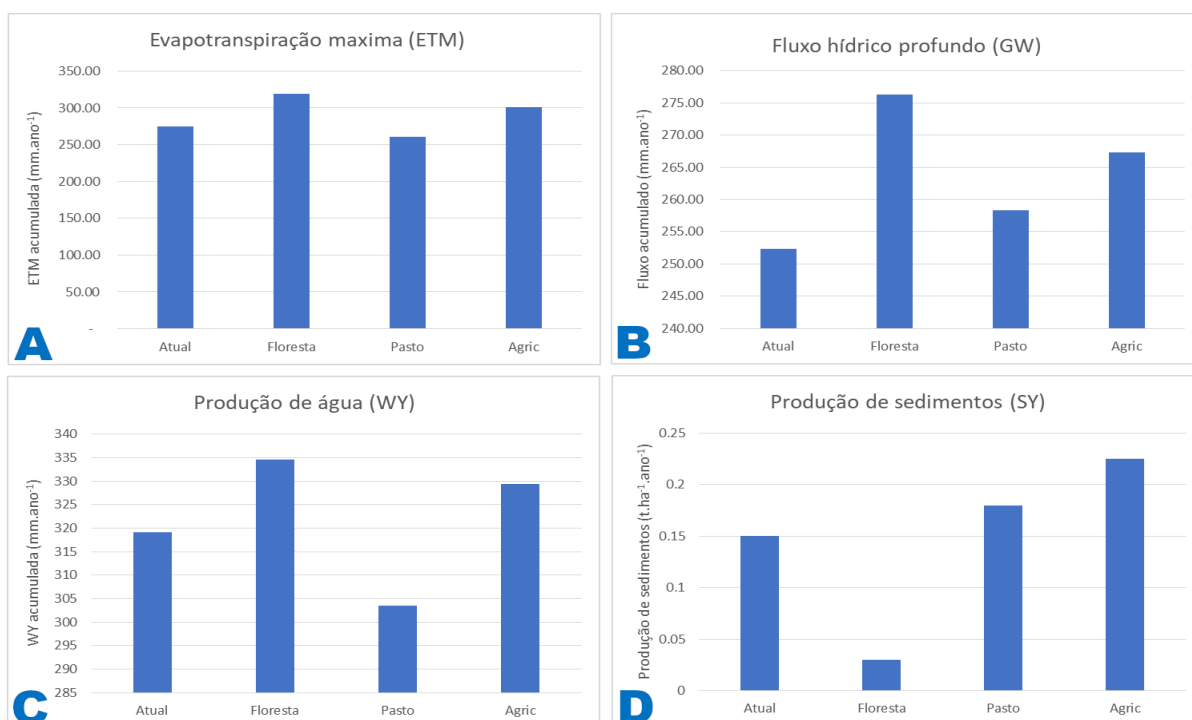
No que concerne à simulação de cenários, na Figura 20 gráficos A, B, C e D estão respectivamente demonstrados os valores acumulados anuais referente à quatro variáveis comparativas que foram consideradas para verificar efetiva consequência das alterações de cobertura e uso e do solo na bacia hidrográfica: Evapotranspiração máxima (ETM), Fluxo hídrico profundo (GW), Produção de água (WY) e a Produção de sedimentos (SY) (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores acumulados anuais médios de ETM, GW, WY e SY, por cenário de cobertura e uso

	Atual	Floresta	Pasto	Agricultura
ETM (mm)	274.32	319.06	260.90	301.16
GW (mm)	252.31	276.24	394.14	267.27
WY (mm)	319.09	334.64	303.54	329.46
SY (t.ha⁻¹)	0.15	0.03	0.18	0.22

Fonte: Própria autoria, 2020

Figura 20 – Valores acumulados anuais médios para os quatro cenários de cobertura e uso do solo simulados com o modelo da BHRI no SWAT.



Fonte: Própria autoria, 2020

Conforme os resultados das simulações apresentados a partir dos gráficos acumulados o cenário onde se apresentaram maiores alterações nas variáveis elencadas anteriormente foi o de cobertura total por florestas. No cenário de conversão total florestas a

evapotranspiração (gráfico A), bem como a produção de água (gráfico C), ultrapassam os 300 milímetros, por outro lado favoreceu a infiltração e o fluxo de recarga do aquífero subterrâneo profundo (gráfico B) uma vez que as raízes das plantas e das árvores favorecem essa formação de condutos naturais para a infiltração da água no solo. Um outro fenômeno interessante é o fato de que ao mesmo tempo em que favorece a infiltração, no entorno das raízes se forma uma camada de água que se distribui por toda a estrutura e superfície das raízes constituindo-se em um bulbo húmido que mantém a água mais próxima à superfície quanto mais densa a vegetação maior o volume suspenso no solo, e justamente este volume de água em ascensão no solo é que contribui significativamente para o aporte lateral de água nos canais de drenagem do terreno.

Um ponto que chama atenção no gráfico B é o fato de que o cenário de cobertura total por pasto favoreceu melhor o fluxo de água para o aquífero profundo que no cenário atual, fato curioso tomando-se em conta que hoje mais de 60% da cobertura vegetal da bacia é por pasto, porém ainda existem resquícios de formações florestais e de áreas utilizadas para agricultura. Outro ponto é que as gramíneas que geralmente compõem a pastagem possuem raízes pouco profundas e não favorecem a formação de canais para a infiltração de tal maneira que as árvores, então o que seria esperado deste contexto era maior escoamento superficial e menos infiltração.

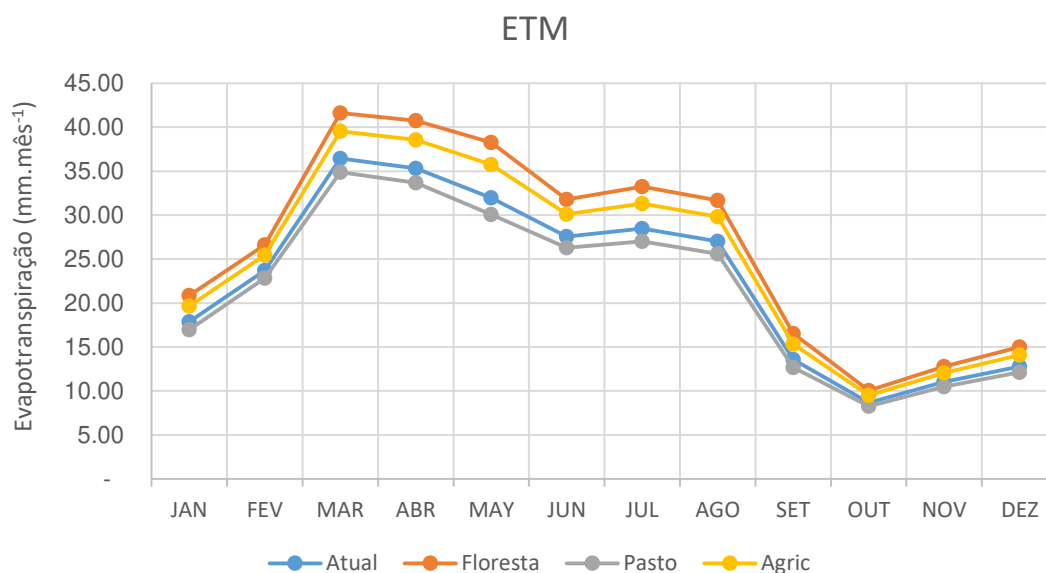
O cenário de conversão total em áreas agricultáveis mantém elevadas taxas de evapotranspiração, fluxo hídrico subterrâneo e produção de água, em contrapartida é o mais danoso ao solo pois potencializa a produção de sedimentos na bacia, o que, por sua vez, gera perda de solo, eutrofização e assoreamento dos canais de drenagem, lagos e lagoas. A geração de sedimentos também gera prejuízos ao agricultor, pois boa parcela do solo perdido é proveniente das camadas mais superficiais justamente as camadas mais férteis do solo, demandando a reposição dos nutrientes ao solo com maior frequência, maiores perdas dos insumos aplicados pelo carreamento superficial, entre outros. Esta informação preocupa, mas alerta quanto a necessidade de se adotar práticas conservacionistas do solo destinadas a manutenção das condições de produtividade e estabilidade, combate a erosão e manutenção do fluxo hídrico mais próximo do natural.

O cenário atual é extremamente preocupante, pois produz menor volume de água do que evapotranspira ocasionando déficit hídrico, apresenta um quadro de pouca permeabilidade do solo não sendo eficiente na recarga do aquífero livre o que por sua vez pode estar contribuindo com as baixas afluências na calha Rio do Ipanema, em função da redução do fluxo de retorno, isto por ser esperado que a água que é captada da precipitação pelo solo em

toda área da bacia, ao passar pela zona vadosa do solo, vá se concentrando elevando o nível da zona saturada, dado que em um tal momento passe a alimentar a calha do rio. Novamente cabe destacar que estes fenômenos estão intrinsecamente representados pelo parâmetro do SWAT, GWQMN, o qual está entre os mais sensíveis do modelo e representa a profundidade máxima do nível do aquífero livre para que haja retorno a calha.

Nas Figuras Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24, observa-se a segmentação periódica pela média anual mensal das variáveis de evapotranspiração máxima, fluxo hídrico profundo, produção de água e produção de sedimentos. Nestes gráficos é possível delimitar o espaço temporal anual onde se apresentam os maiores deltas para estas variáveis. E conforme observado, as maiores variações ocorrem entre final do período de verão início do outono, entre os meses de fevereiro e março, coincidindo com o início do período chuvoso no Nordeste, com um primeiro período chuvoso limitado entre os meses de março e maio, e um segundo período correspondente como o inverno nordestino, que se estende entre os meses de junho e agosto. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), já a partir de março é possível a ocorrência de precipitações acima dos 700mm na região Nordeste, variando conforme a entrada de frentes frias no continente durante o período do inverno.

Figura 21 - Média anual mensal da evapotranspiração máxima por cenário simulado

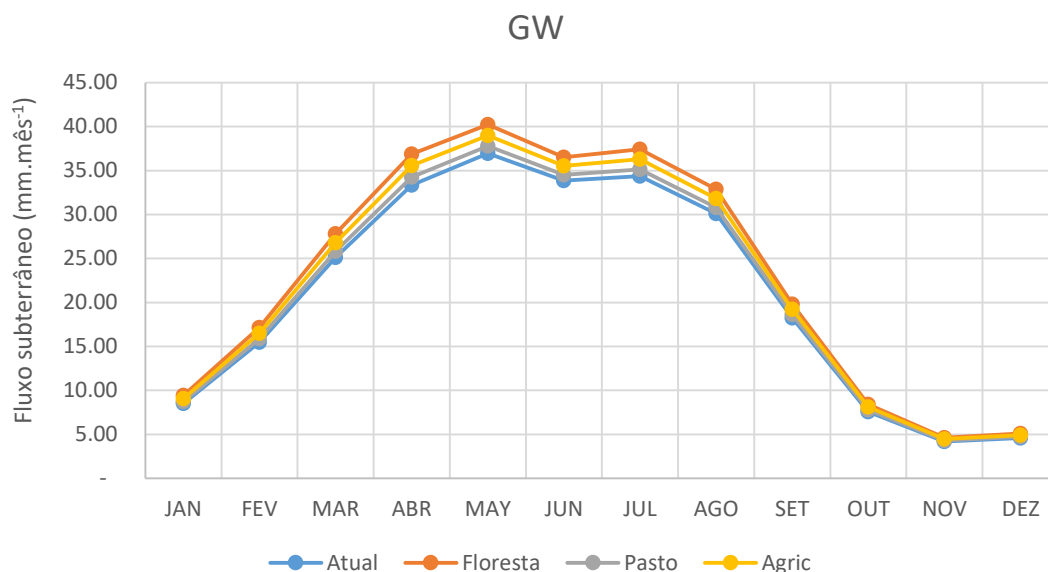


Fonte: Própria autoria, 2020

Pode-se notar que a variação de evapotranspiração tem seu pico em meados do mês de março, início do outono, com temperaturas ainda se ajustando e disponibilidade de humidade na atmosfera, nas plantas e no solo, criando um ambiente propício ao desenvolvimento da

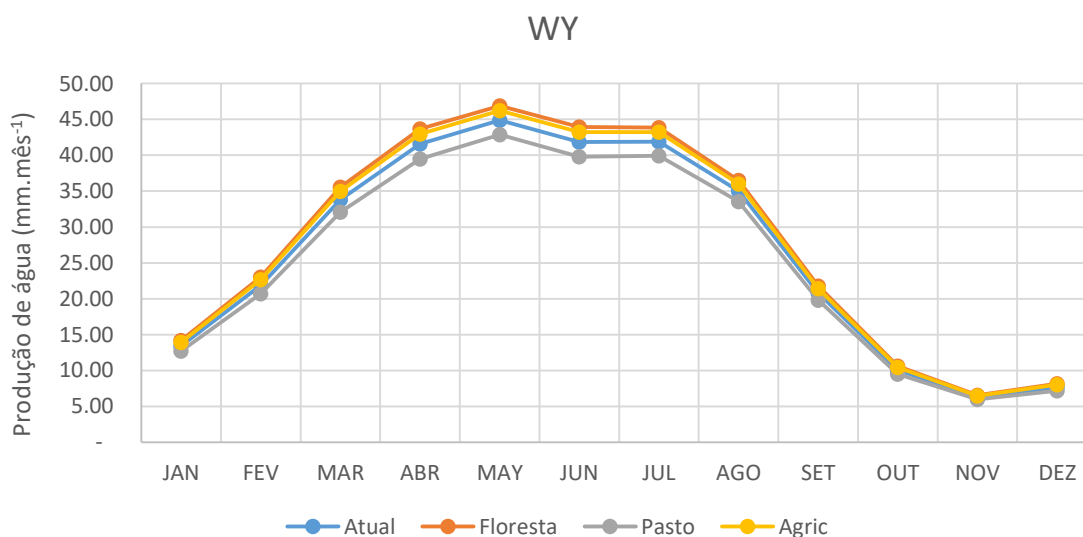
vegetação, neste contexto confirma-se que o cenário de floresta favorece a evapotranspiração (Figura 21), por outro lado, é nestes meses ocorre intensificação do fluxo hídrico subterrâneo (Figura 22), e da produção de água na bacia (Figura 23). Para todas as variáveis supracitadas, os cenários Atual e Pasto apresentam as menores variações nos resultados simulados, portanto as menores contribuições para o fluxo hídrico subterrâneo e para a produção de água.

Figura 22 - Média anual mensal do fluxo hídrico profundo por cenário simulado



Fonte: Própria autoria, 2020

Figura 23 - Média anual mensal da produção de água por cenário simulado

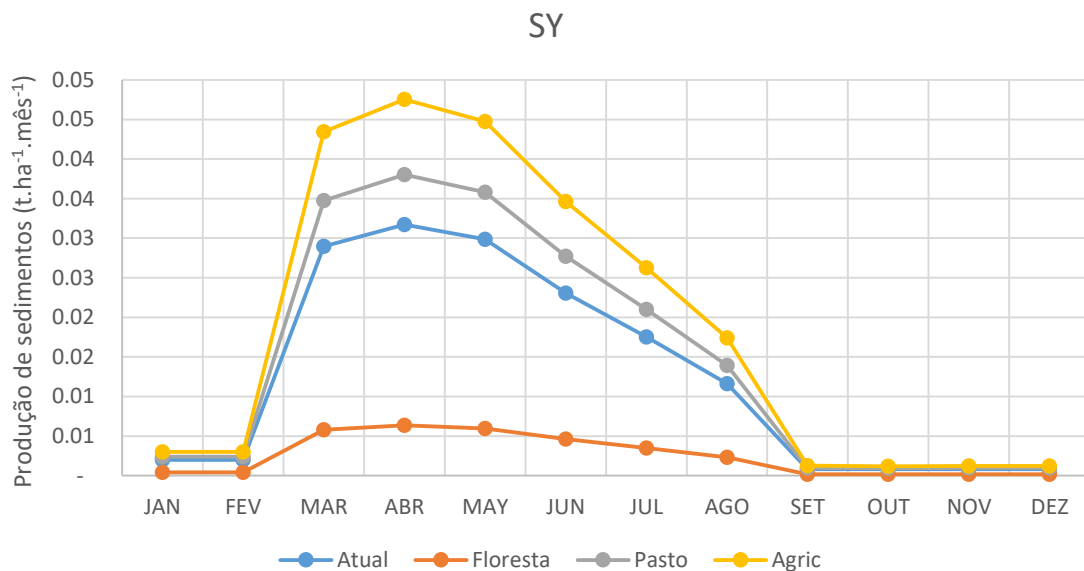


Fonte: Própria autoria, 2020

Fator importantíssimo para a preservação do solo, dos mananciais hídricos e demais funções ambientais, a vegetação, mais precisamente as formações florestais se destacam quando

se trata de contenção de perda de solo e redução da geração de sedimentos, conforme visto anteriormente é possível comprovar agora por meio da Figura 24, no gráfico de produção de sedimentos que mesmo durante o período mais chuvoso do ano, quando a floresta está preservada, a produção de sedimentos, que é um indicativo da ocorrência de processos erosivos acentuados na bacia, diminui. Em contrapartida as atividades antrópicas, com peso na agricultura, estudo de caso, intensificam sobremaneira geração de sedimentos. Confirmando a hipótese/ideia de que a cobertura vegetal é a garantia da sanidade ambiental e da manutenção do regime hidrológico em uma bacia, e que a gestão integrada da utilização do espaço, do uso do solo, dos recursos naturais, e das atividades humanas são primordiais para conter processos de degradação em curso.

Figura 24 - Média anual mensal da produção de sedimentos por cenário simulado



Fonte: Própria autoria, 2020

5 CONCLUSÕES

Com este estudo esperava-se realizar a calibração e validação do modelo para Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema (BHRI) de maneira que fosse possível realizar as projeções de cenários e as análises oportunas. A meta foi atingida parcialmente uma vez que foi possível realizar a calibração do modelo, porém em função da má qualidade dos dados observados não foi possível obter o mesmo bom resultado para a validação.

O modelo foi capaz de simular os cenários projetados e retornar dados fundamentais a interpretação das possíveis influências sobre a dinâmica hidrológica da BHRI. O cenário de cobertura por florestas foi responsável por elevar, de maneira mais significativa, as taxas de evapotranspiração ($\Delta < 35$ mm Atual, e $\Delta > 45$ mm Florestas), fluxo de água subterrâneo ($\Delta < 37$ mm Atual, e $\Delta > 40$ mm Florestas) e produção de água da bacia ($\Delta < 45$ mm Atual, e $\Delta > 47$ mm Florestas).

Ao analisar a produção de sedimentos na bacia, a influência dos cenários muda passando a predominar a agricultura com a maior produção de sedimentos, e a floresta com a menor produção de sedimentos ($\Delta > 0.045$ t/ha Agricultura, e $\Delta < 0.01$ t/ha Florestas).

O SWAT foi capaz de simular processos coerentes com os observados no âmbito da BHRI e com qualidade. Pois evidenciou fatores como os desequilíbrios, entre o aporte hídrico oriundo das precipitações e as elevadas taxas de evapotranspiração, que contribuem para déficit hídrico na região. Além de simular com precisão como os processos hidroclimáticos e sedimentológicos que se apresentam e se intensificam ao longo do ano principalmente nos períodos chuvosos da região Nordeste do Brasil.

Por fim, é necessário implementar ações de recuperação e recomposição das matas nativas. A recuperação da caatinga é fundamental para o reestabelecimento da qualidade ambiental e hidrológica. É primordial a execução de mais pesquisas pedogeológicas na BHRI, e intensificar o monitoramento climático no âmbito da bacia com a finalidade de produzir dados com qualidade e robustez para novos projetos científicos no semiárido de Pernambuco e Alagoas.

REFERÊNCIAS

- AGB PEIXE VIVO. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco**. Agência de Bacias Peixe Vivo. Comitê da bacia hidrográfica do Rio São Francisco. 2016. [S.l: s.n.].
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Conjuntura anual dos recursos hídricos do Brasil**. Brasília/DF – Brasil: ANA, 2018. 74 p.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **HidroWeb: Data base de estações hidrometeorológicas do Brasil**. Brasília/DF – Brasil: ANA, 2018. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso entre: jan e dez de 2019.
- ALMEIDA, C. A. P. de. **Predição de enchimento de barragem por meio de modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Poxim-Açu-SE**. 2013. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013.
- ANDRADE, N. L. R., XAVIER, F. V., ALVES, E. C. R. F., SILVEIRA, A. OLIVEIRA, C. U. R. de. Caracterização morfométrica e pluviométrica da bacia do Rio Manso – MT. **Geociências**. UNESP-São Paulo. v. 27, n. 2, p. 237 – 248, 2008.
- ANGELINI, R. Modelos matemáticos e o entendimento da estratégia de desenvolvimento dos ecossistemas. in: ANGELINI, R., ARAÚJO, J.N., FALCÃO, A.P.C., EDITORES. **Modelagem Ecosistêmica para integração e manejo na Bacia de Campos (Atlântico Sudoeste)**. Rio de Janeiro: Elsevier Habitats, v. 8, p. 1-8, 2017.
- ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., NEITSCH, S. L., *et al.*. **Soil & Water Assessment Tool (SWAT) Ferramentas de Avaliação de Solo & Água: Documentação Teórica**. Ed. 2009. Texas: Instituto de Recurso Hídricos do Texas, 2011. v. 1, nº. 406. 634 p.
- ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., SRINIVASAN, R., *et al.*. **Swat Input/ Output Documentation**. Texas: Texas Water Resources Institute. 2012. 650 p. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/docs/>> Acesso em: jan-dez 2019.
- BALTOKOSKI, V., TAVARES, M. H. F., MACHADO, R. E., *et al.*. Calibração de modelo para a simulação de vazões e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34. n. 1. 2010. p. 253–261.
- BRASIL. Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a **Política Nacional de Recursos Hídricos**, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.
- BRIGHENTI, T. M., BONUMÁ, N. B., CHAFFE, P. L., Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. **RBRH** vol. 21, nº.1, p. 53 – 64. jan/mar 2016
- CARDOSO, C. A.. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Rev. Árvore**. Viçosa. v. 30, nº. 2, Apr. 2006.

CHUN, J. A., BAIK, J., KIM, D., *et al.*. A comparative assessment of SWAT-model-based evapotranspiration against regional-scale estimates. **Ecological Engineering**. v. 122, p. 1–9. Jul, 2018.

COELHO, V. H. R., MONTENEGRO, S., ALMEIDA, C. N., *et al.*. *Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data*. **Journal of Hydrology**. v. 548. p. 1-15. 2017.

COUTO, V. A.; ALVES, A.F.; GUANZIROLI, C.E. A agricultura familiar na região Nordeste. in: SILVA, T.F.P. DA, MONTENEGRO, A.A. DE A., SILVA, J.R.L. DA, *et al.*. Avaliação da precipitação e umidade do solo na bacia do Ipanema, no semiárido de Pernambuco. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves - RS. 17-22 de novembro de 2013. p. 7.

CRUZ, M. A. S., ARAGÃO, R. DE, AMORIM, J. R. A. DE, MENDONÇA, L. C., *et al.*. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrosedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. 37. p. 1091-1102.

DU, X., SHRESTHA, N. K., WANG, J. *Assessing climate change impacts on stream temperature in the Athabasca River Basin using SWAT equilibrium temperature model and its potential impacts on stream ecosystem*. **Science of the Total Environment**. v. 650. 2019. p. 1872-1881.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. in: **Reunião técnica de levantamento de solos**, 10, 1979, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Rio de Janeiro. Súmula...Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FAGUNDES, H. de O., FAN, F. M., PAIVA, R. C. D. de. Calibração automática de um modelo hidrosedimentológico de grande escala usando dados de concentração de sedimentos em suspensão, qualidade da água e sensoriamento remoto. **RBRH** [online]. 2019, vol.24, e26. Epub Apr 25, 2019. ISSN 1414-381X. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180127>.

GASSMAN, P. W., REYES, M., GREEN, C.H., ARNOLD, J.G. *The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions*. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Paper. 2007. p. 1211-1250.

HUNT, J. D., STILPEN, D., FREITAS, M. A. V. DE. *A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 88, n. October 2017. p. 208-222.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**-3ªed. Rio de Janeiro-RJ. 2015. p. 430.

JUNG, C. G., KIM, S. J. *Assessment of the water cycle impact by the Budyko curve on watershed hydrology using SWAT and CO2 concentrations derived from Terra MODIS GPP*. **Ecological Engineering**. v. 118, n. May 2018. p. 179–190.

KOBIYAMA, M., LINO, J. F. DE L., CORSEUIL, C. W., *et al.*. Análise da vazão da bacia hidrográfica do Rio Preto com o modelo SWAT. ResearchGate. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2016. p. 21

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrology Sci. J.** v. 31. n. 1. Oct. 1986. p. 13-24.

KUWAJIMA, J. I.. **Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2012. p. 158.

LAFAYETTE, F. B. *et al.*. Experimentação e modelagem da evaporação em barragem subterrânea numa região semiárida. **RBRH** [online]. 2019, vol.24, e2. Epub Feb 14, 2019. ISSN 1414-381X. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.2431920170167>.

MANETA, M. P., TORRES, M., WALLENDER, W. W., *et al.*. *Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation*. **Agricultural Water Management**. v. 96. n. 8. 2009. p. 1191-1200.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass. Coleção 4. Série Anual. **Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>>. Acessado entre os meses de janeiro a março de 2019.

MORIASI, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., *et al.*. *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. **Transactions of the ASABE**. v. 50, n. 3. 2007. p. 885–900.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., *et al.*. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation - Version 2005*. **Technical Report no 406**. 2009. p. 618.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., *et al.*. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation - Version 2009*, **Technical Report no 406**. 2009. p. 618.

NILAWAR, A. P., WAIKAR, M. L. *Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India*. **Science of the Total Environment**. v. 650. 2019. p. 2685–2696.

PONZONI, F. J., ALMEIDA, E. S. de. **A estimativa do parâmetro Kappa (k) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Salvador – Bahia, 1996. p. 729–733.

PORTO (Organizador), R. La L., LANNA, A. E. L., BRAGA JR., B. P. F., *et al.*. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. 2a ed. Porto Alegre - RS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos /ABRH, Editora da UFRGS. 2002.

RIVAS-TABARES, D., TARQUIS, A. M., WILLAARTS, B., *et al.*. *An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja*. **Agricultural Water Management** v. 212, n. September 2018, p. 211–225, 2019.

SAXTON, K.E., RAWLS, W.J.. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of Agronomy Journal** 70(5):1569-1578, 2006.

SCHIAVETTI, A., CAMARGO, A. F. M. **Parâmetros físicos para gerenciamento de bacias hidrográficas**. [S.l: s.n.], 2002.

SENENT, A. *et al.*. Coupling machine-learning techniques with SWAT model for instantaneous peak flow prediction. **Biosystems Engineering**. 2018. p. 1–11.

SILVA, M. G. da. **Modelagem ambiental na bacia hidrográfica do Rio Poxim-Açu/SE e suas relações antrópicas**. Tese. Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente - Universidade Federal de Sergipe. 2013. p 224.

SILVA, T.F.P. DA, MONTENEGRO, A.A. DE A., SILVA, J.R.L. da, *et al.*. Avaliação da precipitação e umidade do solo na Bacia do Ipanema, no semiárido de Pernambuco. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves - RS. 17-22 de novembro de 2013. p. 7.

SOUSA, W. dos S., VIANA, J. F. de S., SILVA, R. R. da, *et al.*. Estimate water balance of a sub-basin of the Ipanema River Hydrographic Basin with the SWAT Model. **Journal of Environmental**. v. 01. 2018. p. 146–154.

SUTTLES, K. M., SINGH, N. K., VOSE, J. M., *et al.*. Assessment of hydrologic vulnerability to urbanization and climate change in a rapidly changing watershed in the Southeast U.S. - **Rev. Science of the Total Environment**. Published by Ed. Elsevier B.V. v. 645. 2018. p. 806 - 816.

TEKLAY, A., DILE, Y. T., SETEGN, S. G., *et al.*. Evaluation of static and dynamic land use data for watershed hydrologic process simulation: A case study in Gummara watershed, Ethiopia. **CATENA**. v. 172, n. August 2018 p. 65–75.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2a ed. Porto Alegre - RS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos /ABRH, Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. (organizador). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4a ed. Porto Alegre - RS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH, Editora da UFRGS, 2014.

UNIYAL, B., DIETRICH, J., VU, N. Q., *et al.*. Simulation of regional irrigation requirement with SWAT in different agro-climatic zones driven by observed climate and two reanalysis datasets. **Science of the Total Environment**. v. 649, p. 846–865, 2019.

VALLE JR., L. C. G do; RODRIGUES, D. B. B., OLIVEIRA, P. T. S. de. Estimativa da razão de abstração inicial e Curva Número usando dados de chuva e vazão em uma bacia tropical. **RBRH** [online].2019, vol.24, e5. E.pub Jan 31, 2019. ISSN 1414-381X. <<https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170199>>.

VIGIAK, O., LUTZ, S., MENTZAFIOU, A., *et al.*. Uncertainty of modelled flow regime for flow-ecological assessment in Southern Europe. **Science of the Total Environment**, v. 615, p. 1028–1047, 2018.

VIRAES, M. V., CIRILO, J. A.. Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do nordeste brasileiro. **RBRH** [online]. 2019, vol.24, e49. Epub. Nov 14, 2019. ISSN 1414-381X. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180114>.

XAVIER, A.C., KING, C.W., SCANLON, B.R.. *Daily gridded meteorological variables in brazil (1980–2013)* **International journal of climatology Royal Meteorological Society Int. J. Climatol.** 36: 2644–2659 (2016) *Published online 8 October 2015 in Wiley Online Library* Disponível em: < <https://www.wileyonlinelibrary.com> >.

XAVIER, A.C., KING, C.W., SCANLON, B.R..*An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil.* **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR.** INPE Santos-SP CD-ROM. maio 2017. p. 8.

WILLIAMS, R., ARNOLD, J. G. *et al.*. **Soil and Water Assessment Tool.** p. 643, 2011.