



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO-UFRPE

UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA-UAST

CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PESCA

**ESTIMATIVA DO BALANÇO HÍDRICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PAJEÚ UTILIZANDO O MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL*
(SWAT)**

WILSON DOS ANJOS CARVALHO

SERRA TALHADA-PE

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO-UFRPE

UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA-UAST

CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PESCA

**ESTIMATIVA DO BALANÇO HÍDRICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PAJEÚ UTILIZANDO O MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL*
(SWAT)**

WILSON DOS ANJOS CARVALHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Pesca da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Pesca.

Orientadora: Profa. Dra. Carolyne Wanessa Lins de Andrade Farias

SERRA TALHADA-PE

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca da UAST, Serra Talhada - PE, Brasil.

C331e Carvalho, Wilson dos Anjos

Estimativa do balanço hídrico da bacia hidrográfica do Rio Pajeú utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) / Wilson dos Anjos Carvalho. – Serra Talhada, 2019.

53 f.: il.

Orientadora: Carlyne Wanessa Lins de Andrade Farias

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharel em Engenharia de Pesca) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Unidade Acadêmica de Serra Talhada, 2019.

Inclui referências.

1. Modelos hidrológicos - SWAT. 2. Bacia hidrográfica – Rio Pajeú. 3. Hidrologia. I. Farias, Carlyne Wanessa Lins de Andrade, orient. II. Título.

CDD 636

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO-UFRPE

UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA-UAST

CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PESCA

Parecer da banca examinadora da defesa de Monografia de Graduação em Engenharia de Pesca de Wilson dos Anjos Carvalho.

Título: Estimativa do balanço hídrico da bacia hidrográfica do Rio Pajeú utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).

Orientadora: Profa. Dra. Carlyne Wanessa Lins de Andrade Farias

A banca examinadora composta pelos membros abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o aluno Wilson dos Anjos Carvalho do Curso de Bacharelado em Engenharia de Pesca, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, da Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como APROVADO.

Serra Talhada, 12 de Julho de 2019.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Carlyne Wanessa Lins de Andrade Farias

Unidade Acadêmica de Serra Talhada, UFRPE.

Profa. Dra. Luciana Sandra Bastos de Souza

Unidade Acadêmica de Serra Talhada, UFRPE.

Prof. Dr. Ugo Lima Silva

Unidade Acadêmica de Serra Talhada, UFRPE.

Aos meus Pais Sebastião Francisco e Luciene Alice e avó Pedrina Antônia, e todos os familiares e amigos por todo o incentivo que o estudo é melhor caminho para se alcançar nossos objetivos;

A todos os mestres que ensinaram e que foram de extrema importância nessa caminhada, sem eles isso não seria possível;

Ao meu avô Francisco (Chicada) “*in memoriam*” que apesar de não ter estudo, mostrava como a educação transforma a vida de uma pessoa.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Dever cumprido! Essa frase define o meu sentimento ao chegar até aqui, na conclusão desta Graduação. Agradeço primeiramente a Deus por permitir paciência e perseverança nos momentos difíceis na busca dos meus sonhos. Aos meus queridos pais, Sebastião Francisco de Carvalho, Luciene Alice dos Anjos por todo apoio nessa longa jornada. Por desde cedo não medirem esforços para proporcionar uma educação de qualidade e acreditarem sempre nos meus sonhos e sonhá-los junto comigo.

Agradeço de modo muito especial a minha orientadora Profa. Dra. Carolyne Wanessa Lins de Andrade pela confiança, pelos incentivos e oportunidades. Por ser uma pessoa incrível, principalmente com sua paciência e determinação de resolver os problemas a qualquer momento, algo difícil de encontrar hoje. Uma grande satisfação de ter mostrado uma área com grande potencial e que eu estava em busca, falo que não veria trabalhando em outra linha de pesquisa, pois meus olhos brilhavam no momento que processava os mapas e isso dava uma emoção fora do comum. Ao meu colaborador e amigo, Prof. Msc. Alan César Bezerra, por toda contribuição e empenho em todas as horas, sem ele esse trabalho não seria possível. Também concedeu grandes experiências na área de Geotecnologias em estudos na área de sensoriamento remoto e sou muito grato por isso. Ao Prof. Dr. Ugo Lima Silva pela amizade e todo o apoio e incentivo de sempre está buscando os meus sonhos. A Profa. Dra. Luciana Sandra Bastos Souza por acreditar e incentivar em todo meu potencial de chegar onde estou.

A inspiração de homem e pessoa com uma conduta fora do normal ao Professor e amigo Irlânio Gomes, por mostrar que mudar o mundo é possível, basta apenas ir atrás dos sonhos, o mesmo instigou a minha paixão pela área de geografia e geologia que futuramente me encontraria no seguimento da geotecnologia e por isso tenho muita gratidão. Ao Prof. Dr. Alexandre Mendes Fernandes por proporcionar a primeira experiência com *software* de geoprocessamento Qgis no segundo período da graduação, o que instigou ainda mais a curiosidade de aprender sobre essa área.

As escolas Senhorinha Izabel da Conceição, José Vitorino de Barros e Escola de Referência em Ensino Médio de Salgueiro (EREMSAL), por todos os professores e funcionários que contribuíram direta ou indiretamente por essa conquista. A minha turma 2014.2 e agregados por todo apoio e incentivo nessa caminhada em especial: Ana Karla, Rosanne Amaral, Maria Aparecida, Jéssica Carvalho, Íris Dantas, Bruna Noronha, Lucas

Moura, Diego Carvalho, Daniel Victor, Wagner Santos, Filipe Robson, Werverson Ailton, Evelyn Posidonio.

Aos amigos (as) que encontrei nessa longa jornada em particular: Jéssica Góis, Eduarda Lopes, Carla Cínthia, Brígida Leal, Jéssica Coutinho, Áurea Palloma, Kerolayne Siqueira, Tays Ferreira, Thaís Ramalho, Thanires Ramalho, Taís Hilário, Jainny Saraiva, Maria Gabriela Amaral, Monique Marques, Daiane Vaneci, Ayanne Gomes, Jéssica Rufino, Tainá Suellen, Júnior Lima, Larissa Celestino, Milena Nogueira, David Souza, Yuri Lima, Sebastião Neto, Marcelo Ramos, Túlio Matos, Janilson Saraiva, Tayane Silva, Caio Filgueira, Marrone Nascimento, Aoliabe Santos, Jorge Luiz, Talita Aiala, Cícero Halefsom, José Alessandro, José Neto Nogueira, Amanda Menezes, Francisco Gustavo, Erica Nunes, Marília de Viveiros e Gabrieli Oliveira.

Aos contribuintes que sem eles não seria nada fácil terminar esse trabalho em específico: Tayná Helem por auxiliar em relação às classes de solos não medindo esforços para sanar minhas dúvidas. Bruno Allyf por indicar os melhores sites para busca de dados referentes ao mapa de uso e ocupação do solo. Flávia Kleityane por está sempre a disposição no incentivo para concluir esse trabalho sempre perguntado como ia à monografia. Algo que não foi muito fácil de concluir. Érika Santana por sempre esta ajudando em dúvidas específicas e dando apoio motivacional nesse trabalho, Larissa Costa e Carla Barbosa no auxilio das normas de formatação do trabalho.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, a Unidade Acadêmica de Serra Talhada, a todos os docentes que me ensinaram na graduação durante esses cinco anos, que possibilitaram o crescimento profissional e pessoal.

Meu agradecimento a todos que compõe a banca examinadora, por aceitar o convite para avaliação deste trabalho, pela disponibilidade e contribuição.

A todos os funcionários e técnicos da UAST que de forma direta ou indiretamente contribuíram realização desse trabalho.

Por último a todos que compõem EJC Nossa Senhora da Penha e o GEB (Grupo Estrela de Belém), pelo o acolhimento nos momentos felizes e difíceis, mostrando a grande importância da palavra amizade e Fé.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Associação dos usos do solo do SWAT com os usos presentes na bacia do Rio Pajeú.....	35
Tabela 2: Área ocupada por cada tipo de solo presente na bacia do Rio Pajeú.	36
Tabela 3: Características dos postos pluviométricos, fluviométrico e da estação meteorológica utilizada no estudo.....	37
Tabela 4: Características dos postos pluviométricos, fluviométrico e das estações meteorológicas utilizadas no estudo.	40
Tabela 5: Dados estatísticos da comparação entre a vazão observada e a simulada pelo modelo SWAT para o posto de Floresta-PE.	43

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do Rio Pajeú no semiárido brasileiro.....	29
Figura 2: Divisão político administrativa da bacia hidrográfica do Rio Pajeú. Fonte: Feitosa (2012).....	30
Figura 3: Modelo Digital de Elevação para área estudo, recortado e reprojetado para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú (BHRP).	33
Figura 4: Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Pajeú.	34
Figura 5: Tipos de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Pajeú.	36
Figura 6: Divisão das 25 sub-bacias ao longo da bacia hidrográfica do Rio Pajeú.	38
Figura 7: Declividade para bacia do Rio Pajeú, classificada de acordo com informações da Embrapa (2000).....	39
Figura 8: Representação dos processos hidrológicos simulados pelo modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú-(BHRP).	41
Figura 9: Hidrograma das vazões ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) simuladas pelo modelo SWAT observadas para o posto de Floresta- PE.	42
Figura 10: Correlação entre a vazão observada e simulada na modelagem usando o SWAT para posto de Floresta-PE.	43
Figura 11: Médias anuais para precipitação (mm) (A) e evapotranspiração potencial (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.....	44
Figura 12: Médias anuais para evapotranspiração real (mm) (A) e percolação (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.	45
Figura 13: Médias anuais para a umidade do solo (mm) (A) e escoamento superficial (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.	46

Figura 14: Médias anuais para a água subterrânea (mm) (A) e produção de água (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.....	47
Figura 15: Médias anuais da produção de sedimentos (t/ha), para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.	48

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*.

SW_t – reserva final da água no solo (mm).

SW_0 – reserva inicial de água no solo no dia i (mm).

t – tempo em (dias).

R_d – taxa da precipitação no dia i (mm).

Q_{sup} – escoamento superficial no dia i (mm).

E_a – evapotranspiração no dia i (mm).

W_{seep} – percolação no dia i (mm).

Q_{gw} – fluxo de retorno (ascensão capilar) no dia i (mm).

USDA – *Agricultural Research Service*.

SWRRB – *Simulator for Water Resources in Rural Basins*.

MUSLE – Equação Universal de Perda do Solo Modificada.

CN – Curva Número.

SCS – *Soil Conservation Service*.

Q_{sup} – escoamento superficial total (mm).

P_d – precipitação total (mm).

I_a – perdas iniciais, que englobam o armazenamento, a interceptação e a infiltração no solo antes iniciar o escoamento superficial (mm).

S – parâmetro de retenção (mm).

can_{dia} – quantidade máxima de água que é capturada e armazenada no dossel em um determinado dia (mm).

$Canmx$ – quantidade máxima que pode ser capturada e armazenada no dossel quando está totalmente desenvolvido (mm).

IAF – índice de área foliar para um definido dia.

IAF_{max} – índice de área foliar máximo que a planta possui.

$SW_{cam, excesso}$ – quantidade de água disponível para percolar durante o dia (mm).

SW_{cam} – quantidade de água no dia em estabelecida camada de solo (mm).

FC_{cam} – volume de água na capacidade de campo (mm).

W_{rec} – quantidade de água que entra nos aquíferos no dia i (mm).

δ_{aq} – período de drenagem sob os horizontes do solo (dia).

W_{seep} – parcela de água que percola por meio da última camada de solo (mm).

$W_{rec, i-1}$ – parcela de água que adentra no aquífero no dia $i - 1$ (mm).

MEUPS - Equação Universal de Perdas de Solo Modificada.

sed – produção de sedimentos, depois que ocorre a precipitação, no dia em Mg.

Q_{sup} – escoamento superficial em $mm\ H_2O.ha^{-1}$.

q_{pico} – taxa de escoamento de pico em $m^3.s^{-1}$.

$\acute{area}_{URH}$ – área da unidade de resposta em que estima a quantidade de sedimento em ha.

K – fator de erodibilidade do solo.

$Cfator$ – fator de cobertura e manejo.

LS – fator topográfico.

P – fator de práticas conservacionistas.

$CFRG$ – fator de fragmento grosseiro.

% – Porcentagem.

° – Grau.

' – Minuto.

'' – Segundos.

km – Quilômetros.

km² – Quilômetros quadrados.

°C – Graus Celsius.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima.

ANA – Agência Nacional de Águas.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

MDE – Modelo Digital de Elevação.

SIG – Sistema de Informação Geográfica.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*.

USGS – *United States Geological Survey*.

UTM – Universal Transversa de Mercator.

HRUs – Unidades de Respostas Hidrológicas.

URBN – Urban.

PAST – Pasture.

URMD – Residential- Medium density.

RNGB – Range Brushes.

AGRL – Agricultural Land- Generic.

RNGE – Range grasses.

WATR – Water.

INSA – Instituto Nacional do Semiárido.

HYDGRP – Grupos hidrológicos do solo.

SOL_Z – profundidade da camada do solo (mm).

SOL_ZMX – raiz (mm.h^{-1}).

SOL_CLAY – porcentagem de argila (%).

SOL_SILT – silte (%).

SOL_SAND – areia (%).

SOL_CBN – carbono orgânico (%).

SOL_BD — densidade aparente (g.cm^{-3}).

SOL_AWC – água disponível no solo (mm.mm^{-1}).

SOL_K – condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1}).

USLE_K – erodibilidade.

SOL_ALB – albedo (fração).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

txt – texto.

WXGEN – tabela climatológica.

$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ – metros cúbicos por segundos.

Qobs – Vazão observada.

Qsim – Vazão simulada.

R^2 – Coeficiente de determinação.

mm – milímetros.

PRECIPmm – Precipitação (mm).

PETmm – Evapotranspiração potencial (mm).

ETm – Evapotranspiração real (mm).

PERCmm – Percolação (mm).

SWmm – Umidade do solo (mm).

SURQmm – Escoamento superficial (mm).

GW_Qmm – Água subterrânea (mm).

WYLDmm – Produção de água (mm).

SYLD – Produção de sedimentos (t-ha^{-1}).

BHRP – Bacia hidrográfica do Rio Pajeú.

RESUMO

A interferência do ser humano ao meio ambiente modificam as características do ecossistema, bem como os processos relacionados aos recursos hídricos. Tais alterações têm sido estudadas por meio de ferramentas como modelos hidrológicos. Um dos modelos que vem sendo aplicados em diversos países é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Neste contexto, o referente estudo teve como objetivo estimar o balanço hídrico para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú através do modelo hidrossedimentalógico SWAT, visando encontrar os processos hidrológicos para o período de 2008 a 2017. Para fazer o processamento da estimativa do balanço hídrico, o modelo SWAT requer alguns dados de entrada, são eles: Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de uso e ocupação do solo, tipos de solo, dados meteorológicos e pluviométricos. Após a inserção todos os dados de entrada e a simulação hidrológica, o modelo gerou 25 sub-bacias e 191 Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs). Os resultados de valores médios dos processos hidrológicos para o período de estudo foram: escoamento superficial de 110,12 mm, precipitação de 477,6 mm, evapotranspiração real de 150,6 mm, evapotranspiração potencial de 1.667,8 mm, e de percolação 213,9 mm. A ascensão do aquífero raso resultou em 33,31 mm e a recarga do aquífero profundo em 11,69 mm. Ao realizar a comparação da vazão observada com a simulada para a bacia, observou-se que os picos de vazão simulada pelo SWAT foram maiores do que os picos observados. Da mesma forma, foram encontradas diferenças entre as estimativas de fluxo de base entre o modelo e os dados observados. No período de estiagem, o modelo simulou grande parte da vazão chegando à zero, tal fato se relaciona com a característica de rios intermitentes. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,36, o que mostra uma relação bastante fraca entre os dados observados e simulados. Tal fato aponta que o modelo SWAT necessita de calibração e validação para ser utilizado na bacia do Rio Pajeú em estudos futuros, como por exemplo, para estudos de previsão dos impactos das alterações climáticas futuras sobre o balanço hídrico da bacia.

PALAVRAS-CHAVE: Bacia hidrográfica, SIG, modelagem, SWAT.

ABSTRACT

Human interference with the environment changes the characteristics of the ecosystem as well as processes related to water resources. These changes have been studied through tools such as hydrological models. One of the models that has been applied in several countries is the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). In this context, the objective of this study was to estimate the water balance for the Pajeú river basin through the SWAT hydrosedimental model, aiming to find the hydrological processes for the period from 2008 to 2017. In order to make the estimation of the water balance, the SWAT model requires some input data, they are: Digital Elevation Model (MDE), map of land use and occupation, types of soil, meteorological and pluviometric data. After insertion of all input data and hydrological simulation, the model generated 25 sub-basins and 191 Hydrological Response Units (HRUs). The results of average values of the hydrological processes for the study period were: surface runoff of 110,12 mm, precipitation of 477,6 mm, actual evapotranspiration of 150,6 mm, potential evapotranspiration of 1.667,8 mm, and percolation 213,9 mm. The rise of the shallow aquifer resulted in 33,31 mm and the recharge of the deep aquifer in 11,69 mm. When comparing the observed and simulated flows to the basin, it was observed that the SWAT simulated flow peaks were larger than the observed peaks. Likewise, differences were found between the base flow estimates between the model and the observed data. During the dry season, the model simulated a large part of the flow reaching zero, this fact is related to the characteristic of intermittent rivers. The coefficient of determination (R^2) was 0,36, which shows a very weak relation between observed and simulated data. This fact indicates that the SWAT model requires calibration and validation to be used in the Pajeú River basin in future studies, as for example, for prediction studies of the impacts of future climate changes on the basin water balance.

KEYWORDS: Hydrographic Basin, SIG, modeling, SWAT.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2.OBJETIVOS.....	22
2.2 Objetivos específicos	23
3. REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1 Bacias hidrográficas.....	23
3.2 Balanço hídrico	23
3.3 Modelagem hidrológica	24
3.4 Modelo SWAT	25
3.4.1 Escoamento superficial.....	26
3.4.2 Evapotranspiração.....	27
3.4.3 Percolação	27
3.4.4 Água subterrânea	28
3.4.5 Sedimentos	28
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1 Área de estudo.....	29
4.2 DESCRIÇÕES DA FISIOGRAFIA	30
4.2.1 Clima.....	30
4.2.2 Geologia	30
4.2.3 Rede hidrográfica.....	31
4.2.4 Cobertura vegetal	31
4.2.5 Solos	32
5. DADOS DE ENTRADA	32
5.1 Simulação hidrológica no modelo SWAT.....	32
5.2 Modelo digital de elevação (MDE).....	33
5.3 Mapa de uso e ocupação do solo.....	34
5.4 Mapa de tipos de solo	35
5.5 Dados meteorológicos e fluviométrico	36
5.6 Etapas de execução do modelo SWAT.....	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1 Condições iniciais do processamento dos dados de entrada	39
6.2 Balanço hídrico para bacia hidrográfica do Rio Pajeú	40
6.3 Mapas de distribuição espacial das variáveis hidrossedimentológicas.....	44

7 CONCLUSÃO	48
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

O crescimento dos padrões de vida do ser humano, englobado com o manejo inadequado dos recursos naturais, dentre outros fatores, estão prejudicando o fornecimento local, regional e nacional dos recursos hídricos, que são utilizados essencialmente para diversas finalidades como, irrigação, consumo humano, produção de energia, indústrias (ABBASPOUR et al., 2015). Em locais com a distribuição dos índices pluviométricos irregulares e de elevadas taxas evaporativas, como na região semiárida brasileira, as dificuldades com a escassez da água são ainda superiores. Dessa forma, estudos direcionados à compreensão dos processos hidrológicos são de extrema importância para que se tenha uma melhor gestão dos recursos naturais. De acordo com Montenegro et al. (2014), a compreensão das condições hidrológicas demonstram uma melhor forma de preservar os recursos hídricos.

Várias ferramentas de auxílio para tomada de decisões são de suma importância para a adoção de políticas públicas e para auxiliar no manejo dos recursos naturais do Brasil. Segundo Abbaspour et al. (2015), os modelos hidrológicos são relativamente importantes para o planejamento dos recursos hídricos e no suporte de inúmeras demandas, proporcionando o uso sustentável dos mesmos. A maior ou menor capacidade de um modelo hidrológico possuir a eficiência de reproduzir a realidade dos processos hidrológicos está relacionado, em grande parte, com a confiabilidade dos dados experimentais. Dessa maneira, é necessário incluir dados que mostrem alta credibilidade para obtenção de resultados que sejam aceitáveis (ANDRADE et al., 2016). No entanto, é interessante ressaltar, que a obtenção de dados com ótima qualidade em países em crescimento, no caso do Brasil, não significa um procedimento prático. Pois estações que monitoram várias partes do Brasil, não possuem distribuição, quantidade e período de operação suficientes ou apropriados (BRESSIANI et al., 2015), o que configura carência de dados, desencadeando problemas referentes aos estudos.

Análises hidrológicas em bacias hidrográficas são necessárias para entender como funciona o balanço hídrico e os métodos que controlam a movimentação da água, como também os danos e alterações do uso do solo em relação à quantidade e qualidade da água (SOUZA VIANA et al., 2018). Desta forma, a bacia hidrográfica representa uma unidade hidrológica de pesquisa, mas também um local de planejamento, pois todas as propriedades estão amplamente unidas na produção de água (RENNÓ & SOARES, 2003).

Segundo Silva (2014), no decorrer do tempo tem-se observado um crescimento na taxa da degradação do solo e redução na quantidade de água em várias regiões no Brasil e do mundo. Apesar do Brasil possuir uma grande abundância de água, a distribuição não é regular, tanto em espaço quanto no tempo. Diante do exposto, verifica duas problemáticas a

serem observadas, a primeira é a falta de água em algumas localidades, sendo citado a parte do semiárido brasileiro e o outro problema refere-se à baixa qualidade dos recursos hídricos (BATISTA et al., 2013). No Brasil, a escassez dos recursos hídricos está amplamente relacionada com uso de cerca de 70% em perímetros irrigados, o que agrava a demanda por água (SETTI et al., 2001).

Deste modo, as problemáticas aqui levantadas reforçam que são necessárias maiores pesquisas técnicas e científicas para melhor compreensão dos processos hídricos em bacias hidrográficas que ajudem na preservação dos recursos naturais. Dessa forma, compreende-se que os modelos hidrológicos representam de modo adequado os processos hidrológicos e conseguem definir qual a melhor maneira de proceder (SANTOS et al., 2013). Os modelos tem a capacidade de apresentar processamentos físicos de um sistema, e fornecer informações que geralmente não são acessíveis (ANDRADE et al., 2016). A modelagem hidrológica possibilita analisar a robustez das informações adquiridas (dados observados), os quais se encontram através das coletas de dados em bacias hidrográficas, e servem como base para calibração de modelos hidrológicos (SANTOS, 2009).

Aplicação de modelos hidrológicos propicia baixos custos e economia no tempo para verificar alterações físicas e artificiais na bacia, se comparado com uma bacia piloto isso acarretaria um elevado tempo e profissionais capacitados para fazer esses procedimentos de análise dos eventos hidrológicos (NÓBREGA et al., 2008). Ressalta-se ainda que a verificação dos processamentos hidrológicos, é de extrema importância e pode-se monitorá-los no espaço e no tempo com o auxílio de estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas, que são instaladas ao longo da bacia hidrográfica. No entanto, o monitoramento apresenta um elevado custo de operação, que muitas vezes inviabiliza o estudo para as bacias por não abranger toda a área de estudo (SOUZA VIANA et al., 2018).

Dessa forma os pesquisadores estão criando diversos modelos hidrológicos, desde do mais simples ao mais complexos, devido à evolução da computação e inclusão dos mesmos nos SIGs, originando modelos mais eficientes. Os modelos conseguem simular os procedimentos hidrológicos em bacias hidrográficas, possibilitando estimar com maior exatidão e confiança, a taxa de produção de água e sedimentos (COLOMBO et al., 2016).

Um modelo que é amplamente utilizado no Brasil e no mundo para modelagem hidrológica é *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), pois possui uma robustez e capacidade de analisar e correlacionar os elementos físicos em uma bacia hidrográfica. Cientistas têm aplicado o modelo em várias partes do mundo e verificado resultados satisfatórios (ANDRADE et al., 2016; KATAOKA, 2017; DE MEDEIROS & DA SILVA, 2014; SRINIVASAN & PAIVA, 2009; SOUZA, 2015; BRESSIANI et al., 2015).

Essa ferramenta permite descrever diversos processos físicos em uma bacia hidrográfica como, por exemplo, infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial, precipitação entre outras variáveis, na finalidade de verificar os impactos das alterações do uso do solo sobre o escoamento da água (superficial e subterrânea) (NEITSCH et al., 2011a).

A bacia hidrográfica do Rio Pajeú é de extrema importância para o desenvolvimento da região que se desenvolveu em seu entorno. O Rio Pajeú é considerado um rio intermitente, ou seja, a vazão ocorre apenas em determinado período do ano, geralmente no período chuvoso. Os estudos sobre o Rio Pajeú são bastante escassos, necessitando de mais pesquisas que possam melhor compreender os processos hidrossedimentológicos desta bacia, que passa por 29 municípios da nascente a foz.

A vazão para a região do semiárido varia de acordo com regimes de chuvas irregulares e construções de reservatórios ao longo do curso do rio (GALVÍNCIO et al. 2006; MEDEIROS & SILVA, 2014).

O uso de modelos hidrológicos vem crescendo e apresentando, cada dia mais, relevância para as pesquisas relacionadas aos recursos hídricos. Nesse aspecto, a utilização de modelos hidrológicos acoplados a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), vem sendo aplicada cada vez mais para previsão da erosão dos solos e de processos hidrológicos (ZHANG et al., 2009). Entre os modelos que possui essas características, pode-se mencionar o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), sendo um dos modelos mais utilizados em todo mundo (SILVA et al., 2013). O SWAT possui uma interface com melhor adequação de interação ao um SIG enriquecendo a análise de estudos, o que permite a visualização de diversas informações topográficas, morfométricas, entre outras.

A escolha do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para estimar o balanço hídrico e as taxas de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, em comparação a outros modelos, se deu pelo fato de que o mesmo possui diversos variáveis que podem ser analisadas em um só modelo. Pressupõe-se que o modelo SWAT, mesmo sem calibração, consiga estimar satisfatoriamente os processos hidrológicos e sedimentológicos para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú no período analisado.

2.OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do estudo foi estimar o balanço hídrico para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú através do modelo hidrossedimentológico SWAT, visando encontrar os processos hidrológicos para o período de 2008 a 2017.

2.2 Objetivos específicos

Caracterizar área de estudo com dados de entrada de uso e ocupação do solo, tipos de solo, altimetria (Modelo de elevação digital) e dados tabulados para ser aplicado no modelo SWAT;

Realizar estimativa do balanço hídrico para a bacia do Rio Pajeú;

Estimar a taxa de sedimento que é carregado para dentro da área de estudo;

Simular cenários para as sub-bacias separadamente no intuito de mostrar a realidade da área de estudo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Bacias hidrográficas

Bacias hidrográficas são regiões que podem ser consideradas locais com a função de obtenção da água na forma natural pela pluviometria, que faz escoar toda essa carga hídrica para o exutório da bacia. Possuem basicamente um agrupamento de áreas de vertentes e uma região que drena toda água até desaguar na foz (SILVEIRA, 2009).

De acordo com Silveira (2009), as bacias hidrográficas podem ser determinadas como um modelo físico, em que se caracteriza pela seguinte análise: o ganho é a vazão, que entra através da quantidade de água precipitada, enquanto que as perdas não estão relacionadas apenas com a saída de água no exutório, mas também com a quantidade de água referente à evapotranspiração e à taxa de infiltração.

As bacias hidrográficas representam os processos em condições naturais e de acordo com as atividades humanas nelas praticadas, sabendo-se que, qualquer alteração ocorrida na bacia, pode acarretar impactos ambientais (GUERRA & CUNHA, 1996).

Guerra & Cunha (1996) ainda justificam que a sociedade moderna bem desenvolvida, usa as bacias hidrográficas como locais de planejamento e gestão, fazendo diversos diagnósticos de utilização e interesses da água com intuito de garantir a sua qualidade e quantidade.

Yassuda (1993) afirma que uma bacia hidrográfica representa um local de junção das águas com os meios físico, biótico, social, cultural e econômico.

3.2 Balanço hídrico

Segundo Biscaro (2007) o balanço hídrico está amplamente relacionado com o ciclo da água no ambiente, pois o mesmo se caracteriza por ser um modelo responsável por calcular a disponibilidade hídrica de uma região, sendo assim de extrema importância para determinar

a precipitação e a quantidade perdida por evapotranspiração, levando em conta a eficiência de armazenamento de água no solo e na atmosfera.

O modelo hidrológico SWAT é fundamentado na equação do balanço hídrico, possuindo como controle o perfil do solo de 2 m de profundidade (ARNOLD et al., 1998).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Onde: SW_t é a reserva final da água no solo (mm), SW_0 é a reserva inicial de água no solo no dia i (mm), t é o tempo em (dias), R_d é taxa da precipitação no dia i (mm), Q_{sup} é o escoamento superficial no dia i (mm), E_a é evapotranspiração no dia i (mm), W_{seep} é percolação no dia i (mm), Q_{gw} é fluxo de retorno (ascensão capilar) no dia i (mm).

Galvêncio et al. (2006), estudando o balanço hídrico na bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa, região semiárida, verificaram que o escoamento superficial foi alterado ao longo do tempo devido aos barramentos no curso do rio, reduzindo amplamente a vazão. Já Medeiros & Silva (2014), em pesquisa na bacia experimental de São João do Cariri, verificaram que a precipitação mais significativa acontece no período de janeiro a maio, influenciando diretamente na vazão da bacia.

3.3 Modelagem hidrológica

Os modelos hidrológicos são instrumentos eficientes que possibilitam gerir e planejar a utilização sustentável dos recursos naturais, com a finalidade de atender várias demandas existentes (ABBASPOUR et al., 2015). Desse modo, um modelo hidrológico se caracteriza por um padrão matemático do escoamento da água e seus componentes sobre a superfície ou região subterrânea (RENNÓ & SOARES, 2000).

Segundo a extensão espacial das bacias hidrográficas, as mesmas se classificam de acordo com os domínios das áreas de estudos, como pequenas, médias e grandes bacias (CHRISTOFOLLETTI, 1999).

Ressalta-se que a classificação de bacias hidrográficas em pequenas, médias e grandes é muito relativa, levando em consideração diversos fatores, não apenas sendo observada a sua extensão total, mas também a distribuição de alguns fatores do meio natural, fundamentado na dinâmica dos processos hidrológicos, geomorfológicos, pedológicos e biológicos (BARRELLA, 2000).

Hoje existem inúmeros modelos hidrológicos para auxiliar em várias demandas, no entanto, a seleção do modelo mais eficiente deve estar relacionada com a finalidade da

pesquisa e da modelagem em si. Devia et al. (2015) reiteram que o modelo mais viável a usar é aquele com o objetivo de fornecer informações mais aproximadas do real, dinamizando os parâmetros e diminuindo a complexidade.

Um modelo que é capaz de estimar o balanço hídrico para bacias hidrográficas do semiárido é o AÇUMOD, porém esse modelo se ajusta melhor aos processos hidrológicos de reservatórios, tendo à necessidade de usar um tanque de classe A para determinar evapotranspiração potencial (SILANS et al., 2000). Compreende que o modelo possui algumas limitações em comparação com o SWAT. Dessa forma o *Soil and Water Assessment Tool* se destaca, principalmente na abrangência de parâmetros a serem estudados, como também no entendimento da complexidade das bacias hidrográficas.

3.4 Modelo SWAT

Um dos modelos mais utilizados em todo mundo devido sua robustez é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Esse modelo foi criado pela *Agricultural Research Service* (USDA-ARS) em conjunto com a *Texas A&M AgriLife Research*, sendo parcela do *Texas A&M University System*. O SWAT foi desenvolvido na década de 90 e fundamentado no modelo *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB), que primordialmente foi designado para gerir as águas e a circulação sedimentalógica de bacias de zonas rurais dos Estados Unidos (GASSMAN et al., 2007).

O SWAT é um modelo com grandeza de bacias hidrográficas, e simula em passo de tempo diário. Foi idealizado para indicar danos de prática no manejo dos solos e água, formação de sedimentos e agroquímicos nas bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 2012). A partir de sua criação, o modelo vem possuindo constantes modificações e evolução no poder de processamento dos dados, com grande capacidade de realizar simulação de cenários por longos períodos de tempos.

O modelo tem a necessidade de informações próprias de clima, características do solo, topografia e vegetação. Os processos físicos agregados a circulação hídrica, movimentação de sedimento e o ciclo de nutrientes são de modo direto formados no modelo SWAT, utilizando os dados de entrada (NEITSCH et al., 2011b).

De acordo com manual do SWAT (NEITSCH et al., 2011b) o modelo tem eficácia em simular os processos de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, subterrânea, evapotranspiração, fluxo na rede de drenagem, estudos em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, características climáticas e os aspectos da qualidade da água.

Marmontel (2018) usou o modelo SWAT para moldar e simular a vazão e determinar o balanço hídrico para a bacia hidrográfica do Rio Paraibuna, no Estado de São Paulo,

auxiliando na tomada de decisões dos recursos hídricos. Souza & Gastaldini (2014) usou o modelo para avaliar a qualidade da água nas bacias do rio Vacacai-Mirim, no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

Segundo NEITSCH et al. (2011b), o SWAT modela os processos hidrológicos de duas formas: a primeira é considerada área do ciclo hidrológico que controla o volume de água, sedimentos e nutrientes no exutório da bacia. A segunda é o estágio do percurso no ciclo hidrológico, que se define como as descargas presentes nos cursos dos rios e os sedimentos desaguam na foz.

O SWAT emprega a Equação Universal de Perda do Solo Modificada – MUSLE (WILLIAMS, 1995) com objetivo de determinar a formação de sedimentos, trazendo em conta a ação do escoamento nas vertentes e canal fluviométrico. Já em relação à simulação do volume e a vazão da água no canal, o modelo usa a equação de Manning, no qual o período de propagação é avaliado pelo parcelamento do comprimento do canal e a velocidade (NEITSCH et al., 2005).

3.4.1 Escoamento superficial

O escoamento superficial surge quando a quantidade de água é aplicada em uma determinada superfície do solo ultrapassando o valor de infiltração. O SWAT oferece a metodologia para calcular o escoamento superficial: o método da Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS). O método CN foi desenvolvido em 1954 pelo SCS dos Estados Unidos com a finalidade de oferecer a estimativa do escoamento superficial de maneira sólida, considerando ainda a umidade inicial do solo (NEITSCH et al., 2011a). O valor da CN está contido no intervalo de 0 a 100 (valor sem unidade), onde 0 corresponde a uma bacia com condutividade hidráulica infinita e 100 a uma bacia totalmente impermeável (BRIGHENTI, 2015). O escoamento é dado pela seguinte equação:

$$Q_{sup} = \frac{(P_d - I_a)^2}{(P_d - I_a + S)}$$

No qual, Q_{sup} é o escoamento superficial total (mm), P_d é a precipitação total (mm), I_a é a perda inicial que engloba o armazenamento, a interceptação e a infiltração no solo antes iniciar o escoamento superficial (mm), e S é o parâmetro de retenção (mm). A abstração inicial, I_a , é geralmente aproximado de $0,2S$. O parâmetro de retenção varia em função do tipo de solo, uso e ocupação da terra, manejo, declividade e principalmente, pela alteração da água no solo. O parâmetro de retenção é definido por:

$$Q_{sup} = \frac{(R_d - 0,2S)^2}{(R_d + 0,8S)}$$

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

Onde CN é a Curva Número.

3.4.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o principal processo que representa a retirada de água em uma bacia. Compreende todos os procedimentos nos quais a água da superfície do solo é transformada em vapor, a partir da evaporação do dossel de plantas e da evaporação do solo (FERRIGO, 2014). O SWAT concede o cálculo da evapotranspiração potencial por meio da metodologia de Pennman-Monteith (MONTEITH, 1965), além de outras opções. Ressalta-se que o modelo necessita de informações médias climáticas relacionadas ao período de simulação.

Quando a evapotranspiração potencial é definida, a evapotranspiração real é calculada por meio da taxa evaporativa de precipitação capturada pela cobertura da vegetação presente, como também por meio da transpiração das plantas e da evaporação do solo (CARVALHO NETO, 2011).

A quantidade máxima de água interceptada que consegue ser armazenada nas copas é determinada a partir do índice de área foliar, segundo a equação (SANTOS, 2016).

$$can_{dia} = Canmx \cdot \frac{IAF}{IAF_{max}}$$

Sendo, can_{dia} é a quantidade máxima de água que é capturada e armazenada no dossel em um determinado dia (mm), $Canmx$ é quantidade máxima que pode ser capturada e armazenada no dossel quando esta totalmente desenvolvido (mm), IAF é o índice de área foliar para um definido dia, IAF_{max} é o índice de área foliar máximo que a planta possui.

3.4.3 Percolação

A percolação é definida como a passagem da água no solo para aquífero. Surge no momento em que o volume de água excede a capacidade de campo da camada do solo e a parte inferior do solo não está saturada. O processamento acondiciona duas situações: a primeira por meio do espalhamento do estoque e por último através dos poros presentes no

solo (SANTOS, 2016). A quantidade de água disponível no solo para percolação se define com as seguintes equações.

$$SW_{cam,excesso} = SW_{cam} - FC_{cam} \text{ se } SW_{cam} > FC_{cam}$$

$$SW_{cam,excesso} = 0 \text{ se } SW_{cam} \leq FC_{cam}$$

No qual, $SW_{cam, excesso}$ é a quantidade de água disponível para percolar durante o dia (mm), SW_{cam} é a quantidade de água no dia em estabelecida camada de solo (mm) e FC_{cam} é o volume de água na capacidade de campo (mm).

3.4.4 Água subterrânea

A quantidade de água que percola conduz-se a abastecer os aquíferos, rasos e profundos, entretanto ressalta que isso acontece caso não tenha ascensão nos poros do solo (SANTOS, 2016). O volume de água para abastecer ambos os aquíferos pode ser estimado pela seguinte equação:

$$W_{rec} = \left(1 - \exp\left[\frac{-1}{\delta_{aq}}\right]\right) W_{seep} + \exp\left[\frac{-1}{\delta_{aq}}\right] W_{rec,i-1}$$

Onde, W_{rec} é a quantidade de água que entra nos aquíferos no dia i (mm), δ_{aq} é o período de drenagem sob os horizontes do solo (dia), W_{seep} é a parcela de água que percola por meio da última camada de solo (mm), e $W_{rec, i-1}$ é a parcela de água que adentra no aquífero no dia $i-1$ (mm).

3.4.5 Sedimentos

O modelo hidrossedimentológico SWAT representa processos erosivos por meio da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MEUPS). O SWAT possibilita que seja determinado o valor médio anual de percas de solo para um local específico (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

A MEUPS no modelo se define de acordo com a equação seguinte, determinada por Williams (1995).

$$sed = 11,8(Q_{sup} \times q_{pico} \times \text{área}_{URH})^{0,56} \times K_{EUPS} \times C_{EUPS} \times LS_{EUPS} \times P_{EUPS} \times CFRG$$

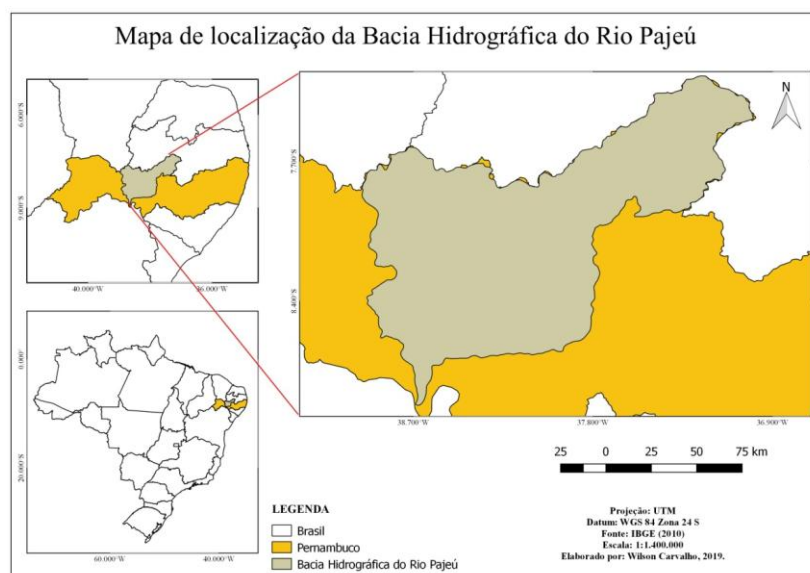
No qual, *sed* é produção de sedimentos depois que ocorre a precipitação no dia, em Mg ; Q_{sup} é escoamento superficial em mm $H_2O.ha^{-1}$; q_{pico} é taxa de escoamento de pico em $m^3.s^{-1}$; $área_{URH}$ é área da unidade de resposta em que estima a quantidade de sedimento, em ha; K fator de erodibilidade do solo; C_{fator} fator de cobertura e manejo; LS fator topográfico; P fator de práticas conservacionistas; e $CFRG$ fator de fragmento grosseiro.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área do referente estudo foi a bacia hidrográfica do Rio Pajeú (Figura 1), que representa um dos últimos afluentes da margem esquerda do Rio São Francisco, compreende a Microrregião do Vale do Pajeú e abrange a Unidade de Planejamento Hídrico UP-9, estabelecida na parte Centro-Oeste do Estado de Pernambuco, integrada na área de domínio do semiárido (FEITOSA, 2012). A área é definida pelas coordenadas geográficas 07°16'20'' e 08°56'01'' de latitude sul e 36°59'00'' e 38°57'45'' de longitude oeste. Possui uma área que abrange 16.685,63 km² e ocupa cerca de 16,97% do território pernambucano (SALGUEIRO & MONTENEGRO, 2008). O rio possui uma extensão de 355 km desde da nascente até a foz no lago de Itaparica, no submédio São Francisco (FEITOSA, 2012).

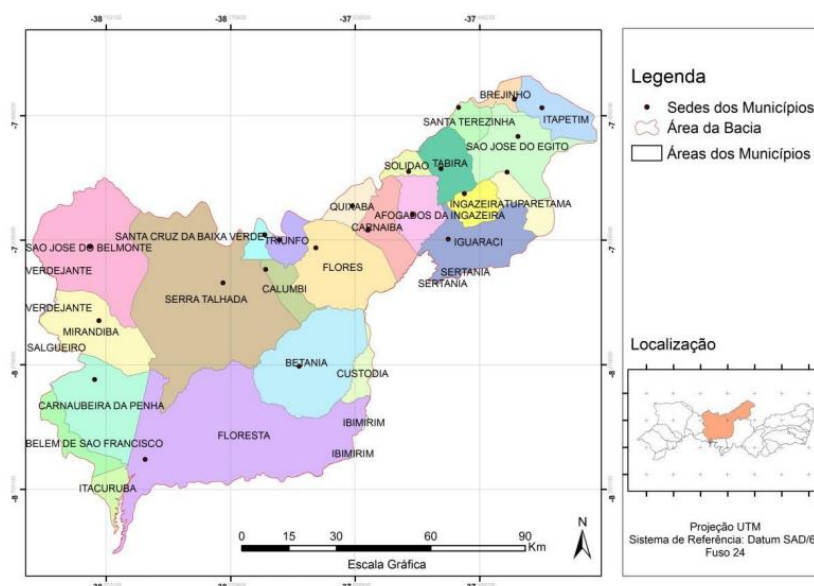
Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do Rio Pajeú no semiárido brasileiro.



A bacia do Rio Pajeú faz divisa ao norte com os estados do Ceará e Paraíba e na parte sul com pequenas bacias de rios interiores, na região leste com a bacia do Rio Moxotó e a porção oeste na divisa do Rio Terra Nova (FEITOSA, 2012).

Segundo Feitosa (2012), a bacia escoa por 29 municípios (Figura 2), sendo que dezesseis deles estão todos inseridos na bacia (Afogados da Ingazeira, Betânia, Brejinho, Calumbi, Flores, Ingazeira, Itapetim, Quixabá, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo e Tuparetama), cinco com a maior porção de suas áreas e sedes dentro da bacia (Carnaíba, Floresta, Mirandiba, Iguaraci e São José do Belmonte), quatro que possuem parte de suas regiões inseridas na bacia (Belém do São Francisco, Carnaubeira da Penha, Custódia e Itacuruba) e quatro com uma pequena parte do território incluso da bacia (Ibimirim, Salgueiro, Sertânia e Verdejante).

Figura 2: Divisão político administrativa da bacia hidrográfica do Rio Pajeú. Fonte: Feitosa (2012).



4.2 DESCRIÇÕES DA FIOGRAFIA

4.2.1 Clima

O clima presente na região da bacia hidrográfica do Rio Pajeú se caracteriza de acordo com a classificação de Köppen, sendo semiárido e categoria BSh, com maiores índices pluviométricos para época de verão a outono e inverno seco, com temperatura anual média 27 °C a 34°C (FEITOSA, 2012). De acordo com Lacerda et al. (2006), o clima caracteriza-se por exibir precipitação média de 700 mm/ano, com risco de chuvas torrenciais e uma elevada irregularidade na taxa pluviométrica.

4.2.2 Geologia

A parte geológica da bacia hidrográfica do Rio Pajeú é caracterizada por apresentar rochas do embasamento cristalino do Planalto da Borborema, com dominância de material

gnáissico-migmatítico e superfície meta-sedimentares da Depressão Sertaneja, com grande parte constituída de por litotipos metaformizados interpolados com uma superfície pedimentares e de encostas de baixo declive, apresentando altitudes médias locais que variam 400 a 600 m (CPRM, 2005).

Segundo Brito Neves et al. (1995) os arcabouços estão associados as rochas máficas, ultramáficas e graníticas, sendo vistas em alguns locais de pediplanos.

4.2.3 Rede hidrográfica

O Rio Pajeú nasce no município de Brejinho e tem um percurso de aproximadamente 353 km. De início, apresenta sentido nordeste-sudeste, até desembocar no lago de Itaparica, no Rio São Francisco. Com regime fluvial intermitente, ao longo do curso circunda os municípios de Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada, e Floresta, os quais seus afluentes principais são: pela margem direita os riachos Tigre, Barreira, Brejo, São Cristovão e Belém e no lado esquerdo os riachos de Cedro, Quixabá, São Domingos, Poço Negro e do Navio (APAC, 2016).

O Rio Pajeú apresenta regime intermitente e dependente da época chuvosa para que possam escoar suas águas sobre a superfície. No período de estiagem, o rio parece desaparecer, quando na realidade está submergido em baixios, constituindo lençol freático com pouca reserva hídrica (ARAÚJO, 2011).

4.2.4 Cobertura vegetal

A vegetação principal da bacia do Rio Pajeú é caracterizada por Caatinga hiperxerófila, que mostra três tipos fisionômicos, de acordo com a hierarquia da topografia, relevo, o embasamento geológico, solo e a umidade. Os tipos são: Caatinga arbórea, Caatinga arbóreo-arbustiva e Caatinga arbustiva. Em regiões mais altas, segundo Jacomine et al. (1973) prevalece uma Caatinga com aspecto mais fechada e com grande riqueza florística, devido a maior umidade, se comparado com regiões mais baixas.

De acordo com Sampaio et al. (2002), na vegetação Caatinga se observam as seguintes composições: a Caatinga arbórea possui altura que varia de oito a doze metros e árvores com grande porte; a Caatinga arbóreo-arbustiva possui tamanho de dois a cinco metros, com árvores misturada com arbustos e locais mais abertos; e a Caatinga arbustiva possui tamanhos menores do que dois metros e plantas com porte reduzido.

De forma geral, a Caatinga tem uma característica particular de adaptação ao clima da região, o que resultou em um sistema ecológico bastante diversificado. Na época de estiagem,

a vegetação perde as suas folhas, facilitando assim, a adaptação das plantas ao clima semiárido (SAMPAIO et al., 2002).

4.2.5 Solos

Os solos do Semiárido, de maneira geral, apresentam fertilidade de média a elevada, com profundidade bastante variada, relacionada com intemperismo das rochas. Segundo Jacomine et al. (1973), existem diversas classes de solos na região Semiárida, no qual o surgimento desses solos está amplamente ligado com a formação geológica das rochas cristalinas e sedimentares.

Na bacia do Rio Pajeú, os solos possuem dois domínios morfoestruturais. O primeiro relaciona-se com áreas mais altas de domínio do Planalto da Borborema, ocorrendo de modo abrangente os Neossolos litólicos, os quais são caracteristicamente rasos e com fertilidade natural que sofre variação; os Argissolos, que apresentam boa profundidade e fertilidade natural de grande variação. O segundo domínio morfoestrutural relaciona-se com regiões mais planas e de maior parte rebaixada, como na Depressão Sertaneja, que possui solos como Planossolos, os quais apresentam fertilidade natural muito variável e os Luvissolos, que são solos rasos (EMBRAPA, 2006).

5. DADOS DE ENTRADA

5.1 Simulação hidrológica no modelo SWAT

No sentido de alcançar a modelagem inicial na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, o modelo SWAT requer alguns dados de entrada. Os dados espaciais são constituídos por um modelo digital de elevação (MDE), um mapa com tipos de solo da região de pesquisa e um mapa de uso e ocupação do solo. São importantes além dos mapas, os dados tabulares relacionados às características climáticas da área de levantamento, estando os mesmos caracterizados por informações de precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa.

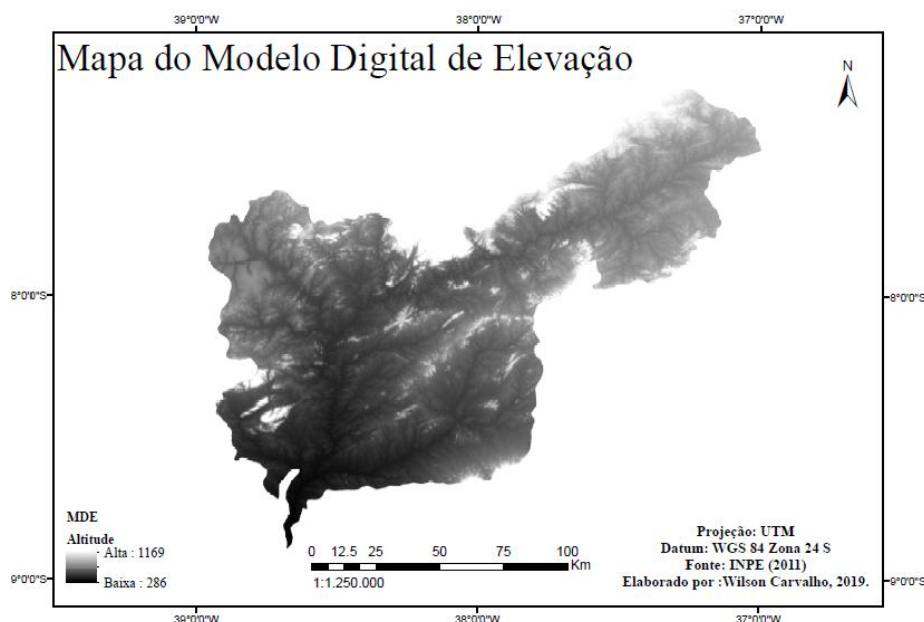
Com o SWAT atrelado no sistema de informação geográfica (SIG), os dados são trabalhados e transformados em informações para processamento e funcionalidade do modelo. Nos tópicos adiante serão expostos às bases de entrada que foram usadas para realizar a modelagem hidrológica com o SWAT na bacia hidrográfica do Rio Pajeú (BHRP).

5.2 Modelo digital de elevação (MDE)

O modelo digital de elevação (MDE) foi obtido por meio do projeto Topodata (INPE), produzido através da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com a disponibilidade das informações *United States Geological Survey* (USGS). As referidas cartas 07S375-ZN, 07S39-ZN, 08S375-ZN, e 08S39-ZN, dos dados SRTM para todo o território brasileiro foram elaborados da resolução espacial genuína de 3 arcos-segundos (90 m) para 1 arco-segundo (30 m) através da intercalação da variedade espacial que mantém em posição da relação do peso dos moldes às suas distâncias, sendo esse procedimento definido como krigagem (VALERIANO & ROSSETTI, 2009). O sistema de coordenadas geográficas das imagens é WGS-84, sendo projetado para WGS 84 UTM zona 24 Sul para estabelecer maior precisão no mapa final, compatibilidade de escala de 1:250.000 referente para região de estudo (Figura 3).

Em ambiente SIG as cartas do Modelo Digital de Elevação foram unidas através da ferramenta miscelânea, o que resultou em um mosaico, esse procedimento foi feito para garantir abrangência da área de estudo. No intuito de tornar o processo mais preciso realizado-se um corte da bacia hidrográfica do Rio Pajeú por um *shapefile* vetor com delineamento da região.

Figura 3: Modelo Digital de Elevação para área estudo, recortado e reprojetado para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú (BHRP).



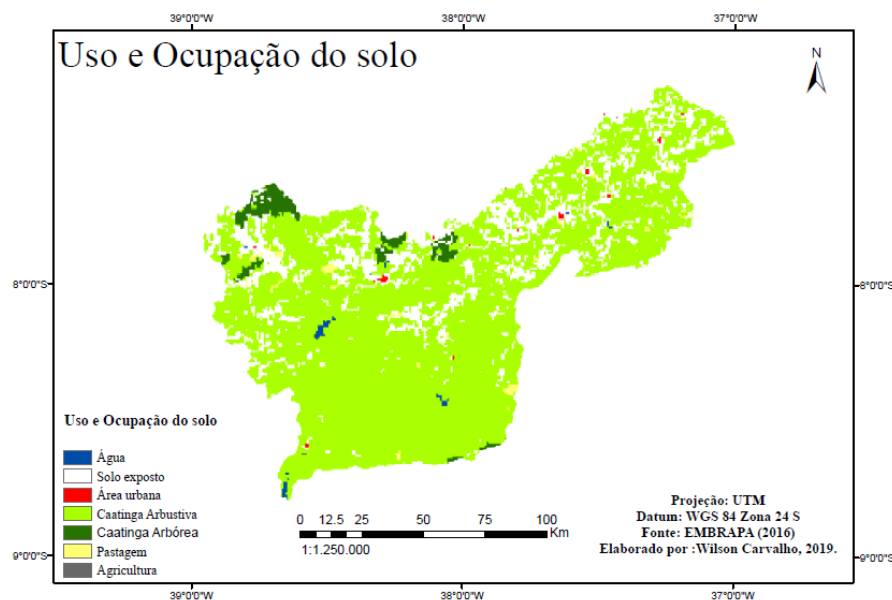
O MDE é capaz de gerar sub-bacias, redes de drenagem, declive da região e as unidades de respostas hidrológicas (HRUs). As HRUs se caracterizam por ser um local de ocorrência em que os cálculos hidráulicos são processados, possibilitando elevada

uniformidade das classes pedológicas, o uso e ocupação do solo, como também a declividade da região de estudo (KATAOKA, 2017).

5.3 Mapa de uso e ocupação do solo

O mapa de uso ocupação de solo (Figura 4) usado no estudo foi elaborado pela EMBRAPA (2016), por meio de imagens de satélite Landsat-8, adquiridas diretamente no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A imagem foi recortada de acordo com delimitação da bacia do Rio Pajeú. Ressalta-se que apesar do banco de dados do modelo possuir uma grande riqueza de classes de uso do solo, não existem classes específicas para toda a parte do mundo, pelo fato do modelo ser de origem norte-americana.

Figura 4: Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Pajeú.



Deste modo, os diferentes usos do solo existentes na região do Rio Pajeú foram reclassificados de acordo com as classes existentes no banco de dados do SWAT (Tabela 1).

Tabela 1: Associação dos usos do solo do SWAT com os usos presentes na bacia do Rio Pajeú.

Uso e ocupação do solo	Classe no SWAT	Área (Km ²)	Área (%)
Área urbana	Urban (URBN)	30,89	0,20
Pastagem	Pasture (PAST)	139,03	0,90
Solo exposto	Residential- Medium density (URMD)	2.754,30	17,83
Caatinga Arbórea	Range Brushes (RNGB)	393,91	2,55
Agricultura	Agricultural Land-Generic (AGRL)	1,54	0,01
Caatinga Arbustiva	Range grasses (RNGE)	12.075,30	78,17
Água	Water (WATR)	52,52	0,34

Fonte: Autor (2019).

5.4 Mapa de tipos de solo

O mapa de tipos de solos (Figura 5) foi obtido através de informações fornecidas pelo Instituto Nacional do Semiárido (INSA), cuja escala é 1:250.000. As bases foram adquiridas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esse mapa foi utilizado como um dos dados de entrada no modelo SWAT, com a finalidade de gerar as unidades de respostas hidrológicas (HRUs). A Tabela 2 apresenta a área ocupada por cada tipo de solo na bacia hidrográfica do Rio Pajeú.

Além do mapa de tipos de solos, o SWAT necessita de uma série de informações tabuladas referentes às classes de solo contidas no mapa. Os parâmetros físicos-hídricos dos solos são de extrema importância que se possa fazer a simulação hidrológica. Os dados de solos pertencentes à região da bacia do Rio Pajeú foram obtidos a partir de diversos artigos como SILVA et al. (2006) e JACOMINE et al. (1973). Tais dados incluem: grupo hidrológicos ao que pertence o solo (HYDGRP), profundidade da camada do solo (SOL_Z - mm), e da raiz (SOL_ZMX - mm.h⁻¹), porcentagem de argila (SOL_CLAY - %), silte (SOL_SILT - %), areia (SOL_SAND - %), carbono orgânico (SOL_CBN - %), densidade aparente (SOL_BD - g.cm⁻³), água disponível no solo (SOL_AWC - mm.mm⁻¹), condutividade hidráulica saturada (SOL_K - mm.h⁻¹), erodibilidade (USLE_K) e albedo (SOL_ALB - fração) (NEITSCH et al., 2005). Todas as características descritas anteriormente foram adicionadas diretamente no banco de dados do modelo.

Figura 5: Tipos de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Pajeú.

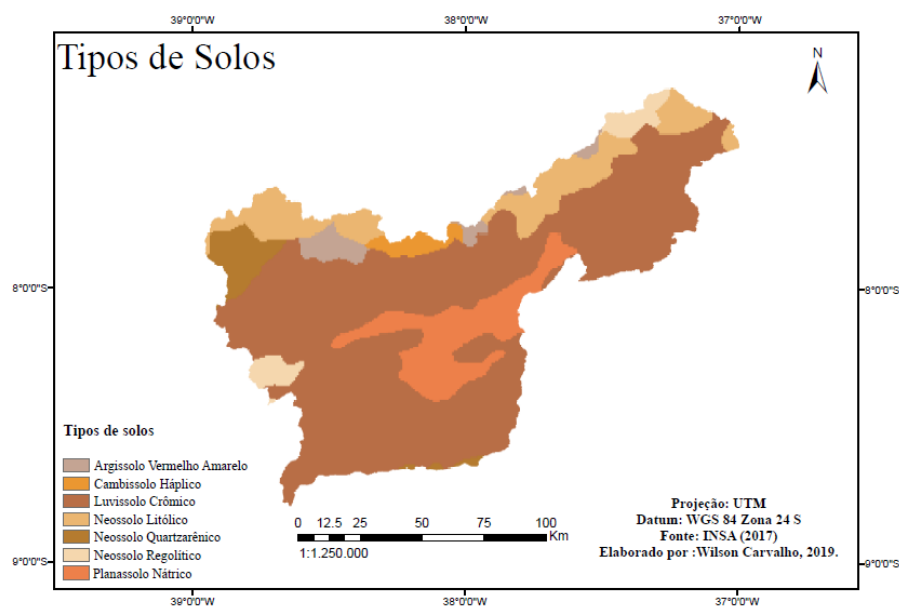


Tabela 2: Área ocupada por cada tipo de solo presente na bacia do Rio Pajeú.

Tipos de Solo	Área (km ²)	Área (%)
Argissolo Vermelho Amarelo	398,55	2,58
Cambissolo Háplico	242,53	1,57
Luvissolo Crômico	10.352,91	67,02
Neossolo Litólico	1.832,07	11,86
Neossolo Regolítico	455,70	2,95
Neossolo Quartzarênico	543,75	3,52
Planossolo Nátrico	1.621,99	10,50

Fonte: Autor (2019).

5.5 Dados meteorológicos e fluviométrico

Para a modelagem hidrológica na bacia do Rio Pajeú com o modelo SWAT, foram utilizadas estações e postos espalhados por toda área de estudo. Os dados meteorológicos foram obtidos a partir do INMET (Triunfo), no período de janeiro de 2008 a dezembro de 2017 (dados diários). Para a precipitação foram utilizadas seis estações, distribuídas ao longo da bacia, e oriundas da Agência Nacional de Águas (ANA). Um posto fluviométrico da ANA, localizado próximo exutório no município de Floresta-PE, também foi utilizado, visando se fazer uma comparação e investigação da vazão simulada (modelagem inicial sem calibração) com a vazão observada. Esse ponto foi escolhido, devido o fato de todo

escoamento superficial do Rio Pajeú passar nesse local, dessa forma mensurando o fluxo total da bacia. A tabela 3 apresenta as informações da estação meteorológica e postos pluviométricos e fluviométrico que foram utilizados no referente estudo.

Tabela 3: Características dos postos pluviométricos, fluviométrico e da estação meteorológica utilizada no estudo.

Código	Nome	Tipo	Responsável	Latitude	Longitude
82789	Triunfo	Meteorológica	INMET	-7,81	-38,11
737023	Afogados da Ingazeira (DNOCS)	Pluviométrica	ANA	-7,74	-37,65
838004	Belém do São Francisco	Pluviométrica	ANA	-8,76	-38,96
737027	Flores	Pluviométrica	ANA	-7,87	-37,98
838021	Floresta	Pluviométrica	ANA	-8,60	-38,58
838002	Açude Serrinha (Mirandiba)	Pluviométrica	ANA	-8,24	-38,53
838031	Serra Talhada	Pluviométrica	ANA	-8,00	-38,24
48860000	Floresta	Fluviométrica	ANA	-8,60	-38,58

Fonte: Autor (2019).

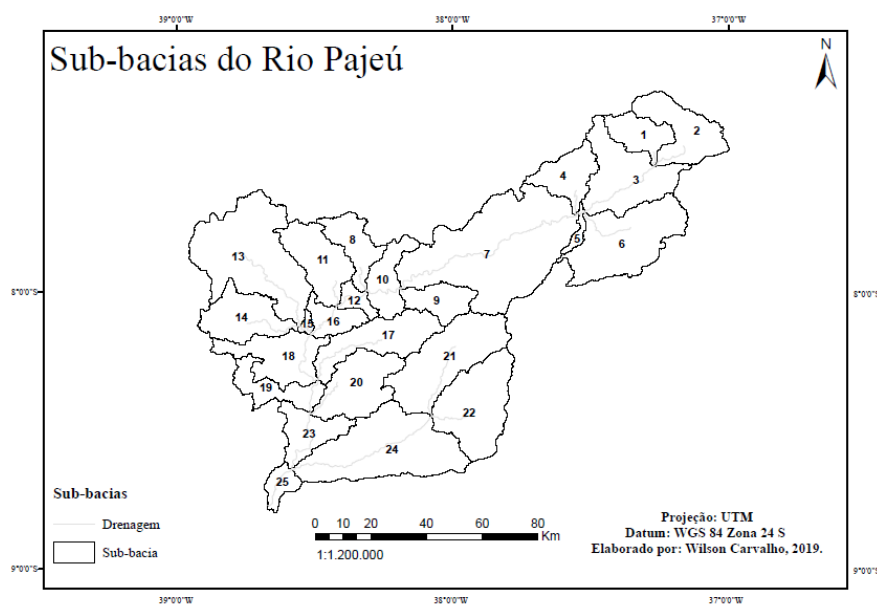
A escolha dos pontos pluviométricos e a estação meteorológica levaram em consideração as séries históricas que representassem menor quantidade de falhas durante o período adotado no estudo. Para o preenchimento de falhas dos postos pluviométricos pelo modelo, as lacunas foram preenchidas por -99, assim o SWAT ajustava os dados faltosos pelo método da média aritmética, de acordo com as referências do manual técnico do SWAT exposto no referencial teórico divulgado por Arnold et al. (2012). Os dados foram organizados em tabela texto (txt), formato padrão requerido pelo o modelo SWAT. Para o preenchimento imediato das falhas o SWAT usou o gerador climatológico WXGEN (SHARPLEY & WILLIAMS, 1990), tendo como referência os dados estatísticos mensais da estação climática. Uma estação meteorológica foi aplicada na obtenção dos parâmetros climáticos fundamentais para executar e alimentar o gerador climático (WXGEN).

5.6 Etapas de execução do modelo SWAT

No início do processo da modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Pajeú foi necessário criar um projeto em ambiente SIG, no qual foram inseridos todos os dados de entrada e foram realizadas etapas de processamento do modelo. Depois da criação do projeto, o primeiro passo consistiu na inserção do MDE da região de estudo, etapa de grande importância para a delimitação da bacia. Esse processo fornece dados de altitude, define a rede de drenagem da área e realiza a separação da bacia em sub-bacias, determinando também padrões para cada sub-bacia.

Para a demarcação da bacia do Rio Pajeú, bem como para a demarcação das sub-bacias, foi usado um recorte do MDE. Com o delineamento da bacia hidrográfica finalizado, o modelo demarcou as sub-bacias e realizou os cálculos dos parâmetros físicos de cada uma. Na execução desse processo foram geradas 25 sub-bacias (Figura 6).

Figura 6: Divisão das 25 sub-bacias ao longo da bacia hidrográfica do Rio Pajeú.



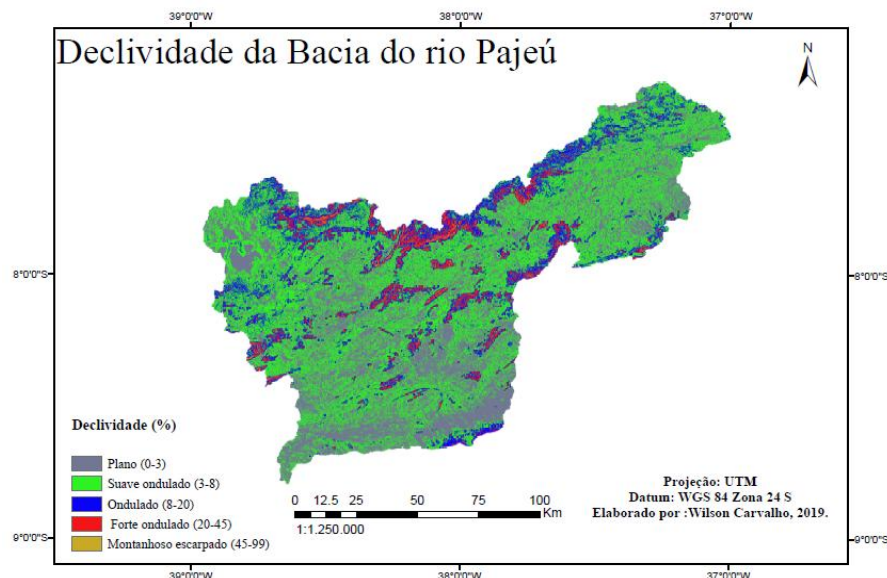
Depois da discretização da bacia foi iniciado o processamento para a criação das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs), e, para isso, foram adicionados os mapas de uso e ocupação do solo e tipos de solo (Figuras 4 e 5).

De acordo com a recomendação da Embrapa (2000), para a região de estudo, determinaram-se cinco níveis diferentes de declividade, nos quais os valores foram os seguintes: 0-3% (plano), 3-8% (suave ondulado), 8-20% (ondulado), 20-45% (forte ondulado) e 45- 75% (montanhoso e escarpado) (Figura 7).

Após a criação das HRUs, foram inseridos os dados diários das variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação solar, e velocidade do

vento), como também as médias mensais dessas variáveis (WXGEN), para criação das tabelas climáticas pelo modelo.

Figura 7: Declividade para bacia do Rio Pajeú, classificada de acordo com informações da Embrapa (2000).



Para o referente estudo utilizou-se um banco de dados organizados para a região da bacia, com todas as variáveis hidrológicas, climáticas, e agronômicas, requeridas pelo SWAT. Para a simulação hidrológica, é necessário definir o período de aquecimento do modelo, com a finalidade preparar o modelo para a simulação. O período de para aquecer o SWAT foram três anos iniciais (2008 a 2010), conforme recomendação dos desenvolvedores do modelo, sendo gerados resultados para o período de 2011 a 2017 (7 anos).

Com encerramento dessa fase, aplicaram-se os procedimentos para início da modelagem hidrológica, onde foram obtidos como resultados o balanço hídrico da bacia, bem como informações fluviométricas e sedimentológicas da região. Os resultados de vazão simulados pelo modelo SWAT foram comparados com os dados de vazão observada da estação de Floresta-PE, a qual está localizada na sub-bacia corresponde ao exutório da bacia do Rio Pajeú.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Condições iniciais do processamento dos dados de entrada

O delineamento automático criou 25 sub-bacias que variam de tamanho entre 36,30 a 2.128 km², no qual possui uma área acumulada de 15.447,49 km², apontada pelo próprio modelo, sem modificação manual. A sub-bacia 25 representa o exutório da bacia do Rio Pajeú

e apresentou uma área de 153, 85 km². As elevações na bacia do Rio Pajeú variam de 286 a 1169 m.

A partir da sobreposição dos mapas de tipos e uso do solo e dos dados da declividade, foram determinadas as HRUs para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú. O procedimento resultou na criação de 191 Unidades de Respostas Hidrológicas. A quantidade de HRUs geradas possuem variações para cada sub-bacia. As HRUs são caracterizadas por meio de áreas uniformes em relação ao uso do solo, tipos de solos e declividade. Para a referente pesquisa, as HRUs foram criadas a partir da junção de 7 classes de uso e ocupação do solo, 7 classes de tipos de solos e 5 classes de declividade.

6.2 Balanço hídrico para bacia hidrográfica do Rio Pajeú

A Figura 8 ilustra os resultados dos processos hidrológicos na bacia do Rio Pajeú, simulados através do modelo SWAT. Verifica-se que a taxa de precipitação média para o período de estudo foi de cerca de 477,6 mm, a evapotranspiração potencial foi de 1.667,8 mm, e a evapotranspiração real foi de 150,6 mm.

A percolação para o aquífero raso resultou em 213,9 mm, a ascensão do aquífero consistiu em 33,31 mm, e o fluxo lateral foi igual 7,08 mm. A recarga para o aquífero profundo foi de 11,69 mm. Para a bacia, o escoamento superficial simulado através do SWAT foi igual 110,6 mm (Tabela 4).

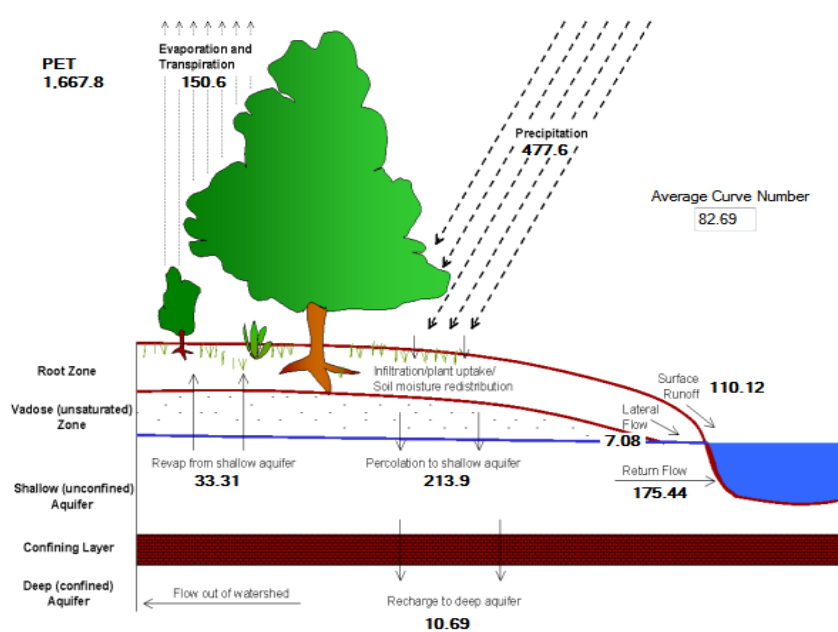
A ilustração dos processos hidrológicos simulados pelo modelo SWAT para a bacia do Rio Pajeú pode ser verificada na Figura 8.

Tabela 4: Processos hidrológicos simulados pelo SWAT com valor médio para bacia hidrográfica do Rio Pajeú-BHRP.

Processo hidrológico	Valor médio para a BHRP (mm)
Escoamento superficial	110,12
Precipitação	477,6
Evapotranspiração real	150,6
Evapotranspiração potencial	1.667,8
Percolação para o aquífero raso	213,9
Ascensão do aquífero raso	33,31
Fluxo lateral	7,08
Curva-Número	82,69
Recarga para o aquífero profundo	11,69

Fonte: Autor (2019).

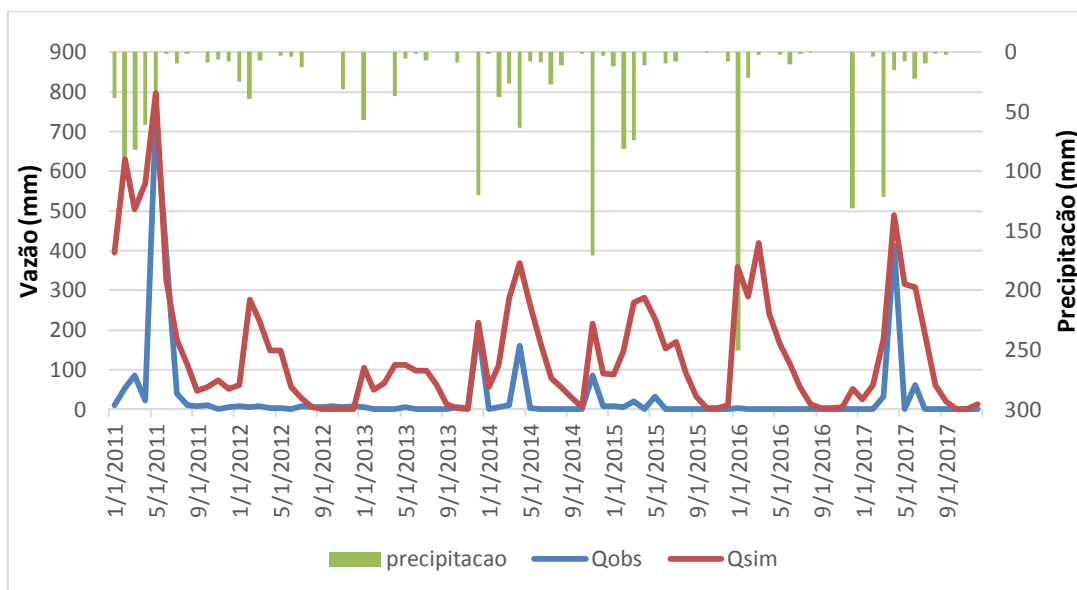
Figura 8: Representação dos processos hidrológicos simulados pelo modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú-(BHRP).



A Figura 9 mostra um hidrograma da vazão média mensal simulada pelo modelo SWAT (para a sub-bacia 25, exutório) e a vazão média mensal observada, referente ao posto fluviométrico de Floresta-PE, além dos dados de precipitação, com base em estações pluviométricas distribuídas por toda a bacia (Afogados da Ingazeira, Flores, Serra Talhada, Floresta, Mirandiba e Belém do São Francisco). O período analisado é desde 01/01/2011 a 31/12/2017. Os dados expressam resultados de vazão sem a calibração do modelo.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o modelo, de maneira geral, acompanhou as vazões observadas, entretanto, os dados simulados superestimaram os dados observados. Os picos de vazão simulados pelo SWAT foram maiores do que os picos observados, principalmente nos anos de 2012, 2013, 2015 e 2016, além de parte de 2014. Por outro lado, verifica-se que o modelo simulou adequadamente os picos dos anos de 2011 e de 2017. Mensura-se, da mesma forma, que nesta simulação, o modelo superestimou o fluxo de base, na maioria dos períodos. Entretanto, observam-se boas correspondências entre os fluxos de base simulados e observados nos períodos de agosto a setembro de 2012, outubro a dezembro de 2015 e novembro a dezembro de 2017.

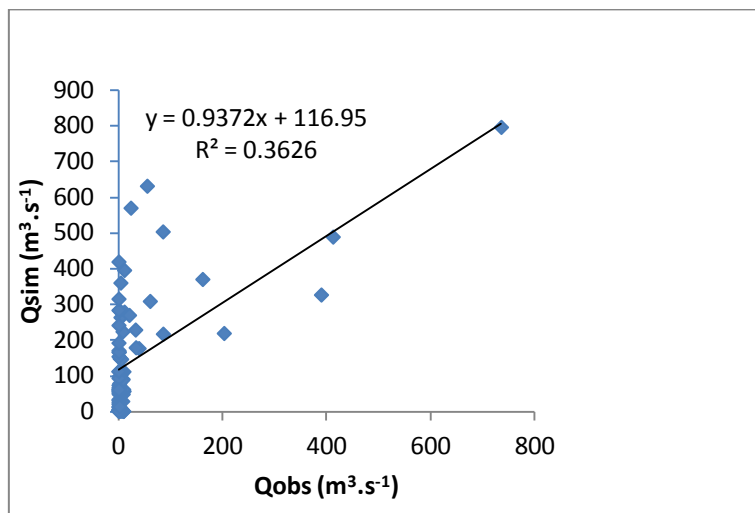
Figura 9: Hidrograma das vazões ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) simuladas pelo modelo SWAT observadas para o posto de Floresta-PE.



Verifica-se que as vazões de pico ocorrem exatamente quando há aumento dos índices pluviométricos, tais como as chuvas de fevereiro de 2011, dezembro de 2013, novembro de 2014, janeiro de 2016 e março de 2017.

A Figura 10 demonstra a correlação entre a vazão observada para o posto fluviométrico Floresta-PE e a vazão simulada pelo modelo SWAT (2011 a 2017). Comparando-se as vazões simuladas e observadas, verifica-se que o coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 0,36, indicando baixo ajuste do modelo aos dados observados. Entretanto, tal fato era de se esperar, uma vez que o modelo SWAT não foi calibrado. Outro fator a levar em consideração para essa baixa correlação foi o local escolhido para fazer a comparação da vazão simulada com observada, pois o Rio Pajeú apresenta diversos reservatórios para armazenamento de água para o período de estiagem, o qual impossibilita o fluxo de forma adequada até chegar no último exutório para o referente estudo.

Figura 10: Correlação entre a vazão observada e simulada na modelagem usando o SWAT para posto de Floresta-PE.



A Tabela 5 aponta informações comparativas entre a vazão observada e simulada no modelo posto fluviométrico em Floresta-PE. Identificou-se que a vazão observada mostra uma diferenciação de $60,04 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ a menos que a vazão simulada através do SWAT, os quais os valores máximos foram $735,66 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $795,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente. Em relação aos valores mínimos, a vazão observada foi maior do que a simulada, com números de $0,462 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $0,02014 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente, apresentando uma diferença de $0,442 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. A vazão média simulada em comparação a vazão média observada apresentou uma diferença de aproximadamente $57,32 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, sendo a vazão média simulada de $160,35 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e vazão média observada de $103,03 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Tabela 5: Dados estatísticos da comparação entre a vazão observada e a simulada pelo modelo SWAT para o posto de Floresta-PE.

Estatística	Vazão Observada ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	Vazão Simulada ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
Máxima	735,66	795,7
Mínima	0,462	0,02014
Média	103,03	160,35

Fonte: Autor (2019).

Castro (2016) usou o modelo SWAT para um estudo de vazões em uma bacia experimental do Alto Rio Jardim-DF, e observou que sem o procedimento de calibração, os valores de vazão simulada e observada não formaram uma correspondência satisfatória para região de estudo. Santos et al. (2013) utilizaram o modelo SWAT para avaliar a vazão

simulada e observada na Bacia do Rio Tapacurá, em Pernambuco, durante os anos de 1997 a 2004. De acordo com os autores, o modelo superestimou a vazão observada para a região de estudo, no entanto, apresentou um R^2 de 0,72, considerado bom. Após o período de calibração, os autores obtiveram um ajuste notável da vazão simulada em relação à observada, com R^2 de 0,90.

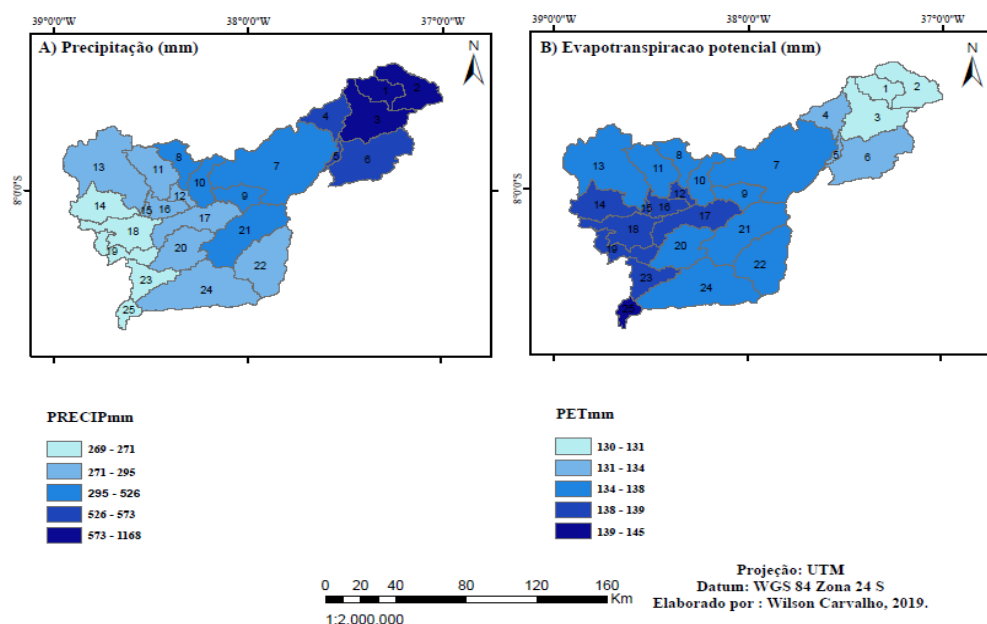
Deste modo, pode-se compreender que é de suma importância que o modelo seja calibrado para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no intuito de gerar informações mais precisas e que garanta resultados satisfatórios. O resultado do R^2 de 0,36 representa uma fraca correspondência entre os dados simulados e observados.

6.3 Mapas de distribuição espacial das variáveis hidrossedimentológicas

Observando-se os resultados da Figura 11A, verifica-se no Alto Pajeú que os índices pluviométricos para as sub-bacias 1, 2, 3 foram os mais elevados, com valores entre 573 a 1168 mm. No Baixo Pajeú os valores menores de chuvas ocorreram para as sub-bacias 14, 18, 19, 23 e 25, as quais apresentaram precipitações entre 269 e 271 mm.

Observando-se os resultados da Figura 11B verifica-se que no Baixo Pajeú a evapotranspiração potencial apresentou uma taxa mais expressiva para a sub-bacia 25, com valores entre 139 e 145 mm. No Alto Pajeú as sub-bacias apresentam valores mais inferiores para a região, sendo elas as sub-bacias 1, 2 e 3, no qual verificou-se informações médias de 130 a 131 mm.

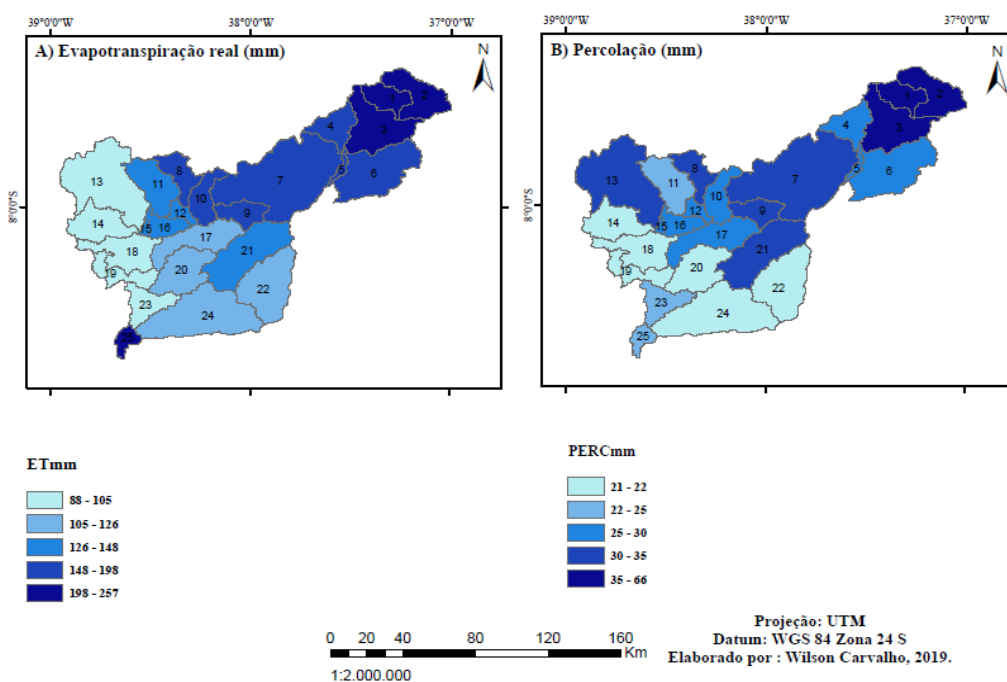
Figura 11: Médias anuais para precipitação (mm) (A) e evapotranspiração potencial (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.



Verifica-se, com base na Figura 12A, que a evapotranspiração real para as sub-bacias 1, 2, 3, 25 foram bem elevadas em comparação às demais. As regiões 1, 2 e 3 são áreas que apresentam solo exposto (Figura 4), entretanto, essa maior taxa de evapotranspiração pode estar relacionada com as áreas de vegetação existentes próximas as estas sub-bacias. No Baixo Pajeú as áreas que apresentam valores inferiores correspondem as sub-bacias 13, 14, 18, 19, 24, áreas nas quais verifica-se vegetação presente.

Observando-se a Figura 12B, nota-se no Alto Pajeú que o valor da percolação se mostrou mais elevado para as sub-bacias 1, 2 e 3, com valores entre 35 a 66 mm. Já no Baixo Pajeú apresentaram resultados menores para as regiões 14, 18, 19, 22, 24, expondo resultados no intervalo de 21 a 22 mm.

Figura 12: Médias anuais para evapotranspiração real (mm) (A) e percolação (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.



Observando-se a Figura 13A, verifica-se que os valores de umidade do solo foram maiores para as sub-bacias 1, 2 e 10, com valores entre 4,29 a 5,57 mm. O resultado menor ficou para a região 13, com intervalo de 0,91 a 1,20 mm.

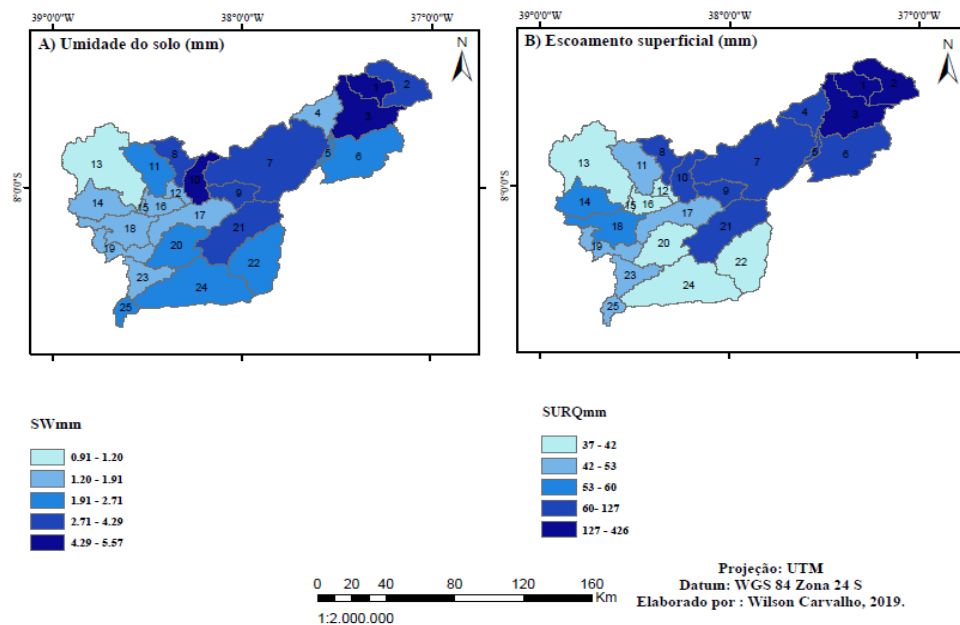
A Figura 13B demonstra a médias anuais do escoamento superficial de cada sub-bacia. As informações apresentadas demonstram que os maiores valores de escoamento superficial ocorreram nas sub-bacias 1, 2 e 3, e, ao mesmo tempo em que no Baixo Pajeú, observa-se que os menores valores se foram para as sub-bacias 12, 13, 15, 16, 20, 22 e 24.

Verificando-se o mapa da Figura 13B e o mapa de uso e ocupação do solo para a bacia (Figura 4), constatou-se que nas sub-bacias 1, 2 e 3 do Alto Pajeú, (as quais apresentaram maiores índices de escoamento superficial), ocorrem uso referente ao solo exposto. Os resultados de maiores valores para o escoamento superficial nas sub-bacias citadas, estão relacionados à redução ou inexistência de proteção vegetal nessas áreas. De acordo com Molinaro et al. (2017), modificações na vegetação alteram a dinâmica dos processos hidrológicos, pois a retirada da cobertura vegetal deixa o solo exposto e consequentemente, eleva a taxa de escoamento superficial.

Em relação às áreas que apresentaram um escoamento superficial baixo, apesar de verificar locais com solo exposto significativamente elevado nessa região, esse fato pode estar relacionado com o índice de chuva relativamente baixo para esta região, de acordo com Molinaro et al. (2017).

Segundo Lagadec et al. (2016), a elevada taxa de escoamento superficial pode acarretar sérios problemas, abrangendo eventos como solo erodido, enchentes em rios, carreamento de lama e detritos, podendo prejudicar a região por meio de perda de solo e da passagem de agentes poluidores contidos nos solos; e o escoamento superficial, de forma geral, é definido como a quantidade de água precipitada que não infiltra na superfície e segue até chegar no destino final.

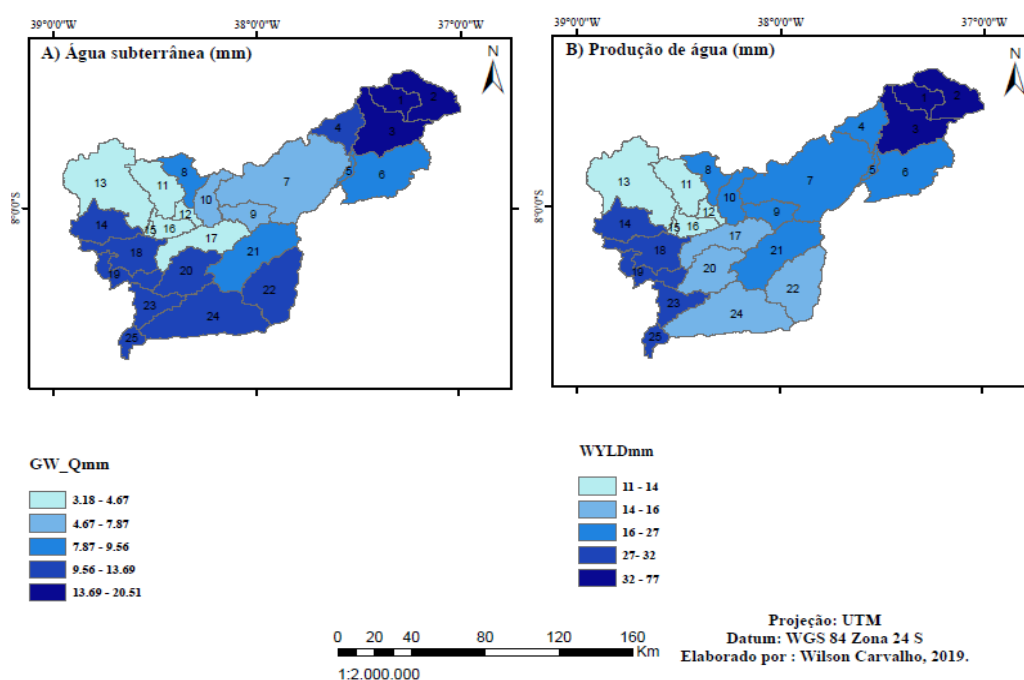
Figura 13: Médias anuais para a umidade do solo (mm) (A) e escoamento superficial (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.



A Figura 14A mostra que no Alto Pajeú a taxa de água subterrânea é mais expressiva ficou para as sub-bacias 1, 2 e 3, com valores de 13 a 20 mm. No Baixo Pajeú os índices baixos ficaram para a área 11, 12, 13, 15, 16 e 17 apresentando uma média de 3 a 4 mm.

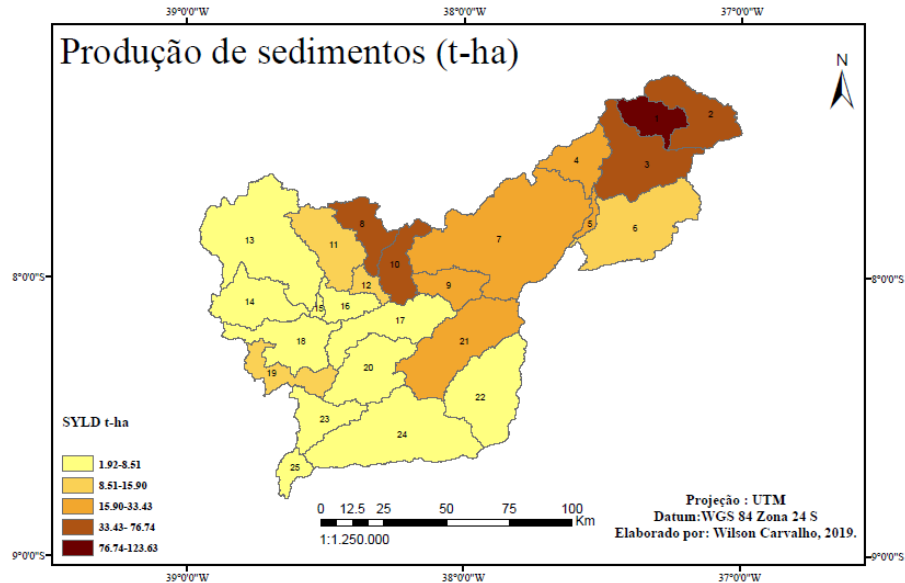
O mapa da Figura 14B para o Alto Pajeú a produção de água apresenta os maiores índices para a região 1, 2 e 3, com valores no intervalo de 32 a 77 mm. Já no Baixo Pajeú nas sub-bacias 11, 12, 13 e 15, os valores foram os mais baixos, entre 11 e 14 mm.

Figura 14: Médias anuais para a água subterrânea (mm) (A) e produção de água (mm) (B) para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.



O mapa da Figura 15 mostra que a taxa de sedimentos carreados para a bacia em quantidade de toneladas por hectares apresentou valor mais expressivo no Alto Pajeú para a sub-bacia 1, com uma taxa estimada entre 76,74 e 123, 63 t/ha. Tal resultado pode estar relacionado com o fato de ser uma área com maior incidência de solo exposto (Figura 4), e também uma área com maior índice de precipitação para o período de estudo. Os menores valores de sedimentos ficaram para o Baixo Pajeú nas sub-bacias 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 24 e 25, com valores em torno de 1,92 a 8,51 t/ha.

Figura 15: Médias anuais da produção de sedimentos (t/ha), para cada sub-bacia, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2011 a 2017.



7. CONCLUSÃO

As áreas que apresentaram maiores índices de pluviometria, menores índices de evapotranspiração, e maiores valores de escoamento superficial (Alto Pajeú) foram as que apresentaram os maiores valores de produção de sedimentos. Tais áreas apresentam classes de uso e ocupação denominadas de solo exposto.

O modelo SWAT demonstrou ser uma ferramenta adequada para estimar o balanço hídrico, bem como os processos hidrossedimentológicos da bacia hidrográfica do Rio Pajeú, entretanto, os resultados indicaram que o modelo precisa passar por procedimentos de calibração e validação para ser utilizado em estudos de simulação de cenários.

A baixa correlação verificada entre os dados de vazão simulados pelo modelo SWAT com os dados observados pode estar relacionada com a existência de reservatórios ao longo do Rio Pajeú e seus afluentes, os quais não foram considerados na modelagem hidrossedimentológica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733-752. 2015.

APAC – **Agência Pernambucana de Águas e Clima**. 2016. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=20>. Acesso em: 03 jun. 2019.

ANDRADE, C. W. L. et al. Modelagem Hidrológica de uma sub-bacia do Alto Mundaú utilizando o modelo SWAT. In: XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2016. *Anais ...* Aracajú, SE, 2016.

ARAÚJO, S.M.S de. A região semiárida do nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica-Revista Científica da FASETE**, v. 5, n. 5, p. 2-4, 2011.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. MUTTIAH, R. S. WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 1-17, 1998.

ARNOLD, J. G. et al. **SWAT: Model Use, Calibration, And Validation**. Transactions of the ASABE. p. 1491 – 1508, 2012.

BARRELLA, W et al. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO, H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: Fapesp, p. 12 p 187-207, 2000.

BATISTA, W. R. M. et al. Determinação do balanço de radiação com auxílio de imagens orbitais na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré, Sergipe. **Scientia Plena**, v. 9, n. 4, p. 01-10, 2013.

BISCARO, G. A. Meteorologia agrícola básica, 1º edição. **UNIGRAF-Gráfica e Editora União Ltda**. Cassilândia-Mato Grosso do Sul, 2007.

BRESSIANI, D. A. et al. Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil, **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 125-139, 2015.

BRITO NEVES, B. B. et al. A tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. Belo Horizonte, **Geonomos**, v. 3, n. 2, p.1-21, 1995.

CASTRO, K. B. et al. APLICAÇÃO DE SÉRIE TEMPORAL MÍNIMA PARA SIMULAÇÃO DE VAZÕES EM BACIA EXPERIMENTAL DO CERRADO. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 8, 2016.

CARVALHO NETO, J. G. **Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados Com o Modelo SWAT**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

CHRISTOFOLETTI, A. – **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Capítulo 1 – Sistemas e Modelos. 1ª ed. Editora Edgard Blücher LTDA, p 14, 1999.

COLOMBO, T. C. et al. Estimativa de vazão de uma Bacia Hidrográfica do Sul de Santa Catarina com modelagem distribuída. In: V SIMPÓSIO DE INTEGRAÇÃO TECNOLÓGICA DO SUL CATARINENSE, 2016. Araranguá. *Anais ...* Araranguá, 2016.

CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea. Recife: PRODEEM, 2005. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Sobre-a-CPRM/Equipe-e-Enderecos/Superintendencia-de-Recife-SUREG%7CRE-200.html>. Acesso em 25 jun. 2019.

DA SILVA, Flávio Hugo Barreto Batista et al. Principais solos do semi-árido do Nordeste do Brasil:" Dia de Campo". In:**Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CURSO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2., 2006, Juazeiro-BA. *Palestras...* Juazeiro, BA: MAPA; SFA-BA; Embrapa Semi-Árido; Embrapa Solos, 2006.

DEVIA, G. K. et al. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA SOLOS. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco**. Boletim de Pesquisa n.11. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 378p.

FEITOSA, A. **Zoneamento de pequenas bacias hidrográficas e caracterização de várzeas na Bacia do Pajeú, Pernambuco**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF**. 164 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano; SOUSA, F. A. S.; SRINIVASAN, Vajapeyan Srirangachar et al. Balanço hídrico à superfície da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa.**Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 3, p. 135-146, 2006.

GASSMAN, P. W. et al. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **SWAT Invited Review Series**, 2007. p. 1212 – 1213.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 353.

JACOMINE, P. T. et al. **Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Divisão de Pesquisa Pedológica, vol. 1. (Boletim Técnico 26, Pedologia 14). Recife, PE, 1973.

KATAOKA, F. E. **Ferramenta SWAT para modelagem hidrológica na área da bacia do Ribeirão Cafezal em Londrina-PR**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

LACERDA, F. et al. Temperaturas do ar médias anuais. In: ATLAS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DE PERNAMBUCO. Recife: Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco, p.16-17, 2006.

LAGADEC, L. R. et al. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of hydrology**, v. 541, 2016. p. 495-509.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, v. 1, 2011.

MARMONTEL, C. V. F. Modelo hidrológico SWAT na bacia hidrográfica do rio Paraíba, região da Mata Atlântica-São Paulo. Brasil, 2018.

MEDEIROS, Isabella Carvalho; SILVA, Richarde Marques. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. **Geociências**, v. 33, n. 3, p. 457-471, 2014.

MOLINARO, Y .T. et al. Monitoramento dos processos hidroerosivos superficiais e análises físico-químicas do topo do solo em corte de encosta. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, 2017. p. 4589-4594.

MONTENEGRO, S. M. G. L. et al. Hydrological studies in experimental and representative basins in Pernambuco State, Brazil. *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions* Proceedings of ICWRS, Bolonha, Itália, 2014.

MONTEITH, J.L. Evaporation and the environment. In the movement of water in living organisms, XIXth Symposium. Soc. of Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press, 1965. p. 205-234.

NEITSCH, S. L. et al. Soil and Water Research Laboratory. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Agricultural Research Service Blackland Research Center-Texas Agrilife Research. Texas A&M University System, 2011b.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation** - version 2011. Texas: Blackland Research Center, 2011a.

NEITSCH, S. L. et al. Soil and water assessment tool: theoretical documentation - version 2005. Texas: Blackland Research Center, 2005. p. 525.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P. ; SOUZA, F. A. S. Análise da utilização de dados do satélite TRMM em um modelo hidrológico semidistribuído na bacia do rio Jamari (RO). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, p. 49- 60, 2008.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. 2003. Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003. Belo Horizonte . *Anais ...* Belo Horizonte, MG, 2003.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas Ação “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. **Relatório Técnico Parcial**, 2000, p. 8.

SALGUEIRO, João H.P.B; MONTENEGRO, Suzana M.G.L. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico. **Revista Tecnologia**, v. 29, n. 2, 2008.

SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos- Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SANTOS, J. Y. G. et al. Aplicação do modelo SWAT para a simulação chuva-vazão na Bacia do Rio Tapacurá, Estado de Pernambuco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013. *Anais ...* Bento Gonçalves, RS, 2013.

SANTOS, R.F. Análise da produção da carga líquida na bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SAMPAIO, E. V. S. B. et al. (Eds.). **Vegetação e flora da caatinga** - contribuição ao Workshop Avaliação e Identificação de Ações Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição dos Benefícios da Biodiversidade do Bioma Caatinga, em Petrolina, 5/2000. Recife: Associação Plantas do Nordeste – APNE / Centro Nordestino de Informações sobre Plantas – CNIP, 2002.

SETTI, A. A. et al. 2001. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: Agência Nacional da Água, 2001.

SILANS, A. M. B. P. et al. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do PEIXE-Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre**, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000.

SILVA, C. A. I. **Análise de aplicabilidade da interface do modelo hidrológico SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos em uma bacia no Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2014.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Identification of critical erosion prone areas and estimation of natural potential for erosion using GIS and Remote Sensing. **Revista Brasileira de Cartografia**, 65(2), p. 125-136, 2013.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, Carlos E. M (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**, 2009.

SOUZA, M. M.; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Eng Sanit Ambient**, v. 19, n. 3, p. 263-274, 2014.

SOUZA VIANA, Jussara Freire et al. Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE utilizando o modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 155-172, 2018.

SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. EPIC – **Erosion productivity impact calculator: Model Documentation**. Washington: U.S: Department of Agriculture, 1990.

SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil. **Science in China Series E Technological Sciences**, v. 52, n. 11, p. 3348-3356, 2009.

SOUZA, V. A. S. **Monitoramento hidrossedimentológico com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – bacia do rio Machadinho/RO**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

SOUZA, W. V de. **Aplicações do Modelo SWAT no Brasil: Revisão e Estudo de Caso – Amazônia**. 40p. Trabalho Final de Curso (Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal De Juiz De Fora. Juiz De Fora, 2016.

VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F. **TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2009.

WILLIAMS, J. R. Chapter 25: The EPIC Model. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Littleton: Water Resources Publications, 1995.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Washington D.C., USDA, Agriculture Research Service. 58p. (**Agriculture Handbook**, 735), 1978.

YASSUDA, E. R. **Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais**. Ver. Adm. Púb., v.27, n.2, p.8, 1993.

ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGUMARAN, R. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. **Land Degradation and Development**, v. 20, n. 1, p. 84-91, 2009.