



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**- MESTRADO -**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS RESOLUÇÕES  
ESPACIAIS DE MDE NA ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA USANDO O  
MODELO SWAT+**

*por*

***Vanine Elane Menezes de Farias***

*Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do  
grau de Mestre*

**João Pessoa–Paraíba**

**Março de 2021**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
- MESTRADO -**

*Vanine Elane Menezes de Farias*

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS RESOLUÇÕES  
ESPACIAIS DE MDE NA ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA USANDO O  
MODELO SWAT+**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

F224a Farias, Vanine Elane Menezes de.

Avaliação da influência das resoluções espaciais de MDE na estimativa do escoamento superficial de uma bacia hidrográfica usando o modelo SWAT+ / Vanine Elane Menezes de Farias. - João Pessoa, 2021.  
64 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia - Bacias Hidrográficas. 2. Sistemas de Informações Geográficas (SIG). 3. Sensoriamento remoto. 4. Modelo Digital de Elevação (MDE). 5. Modelagem hidrológica. 6. Semiárido. I. Silva, Richarde Marques da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 62:556.51(043)

***“AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS RESOLUÇÕES ESPACIAIS DE MDE NA  
ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE BACIA HIDROGRÁFICA DO  
SEMIÁRIDO USANDO O MODELO SWAT+”***

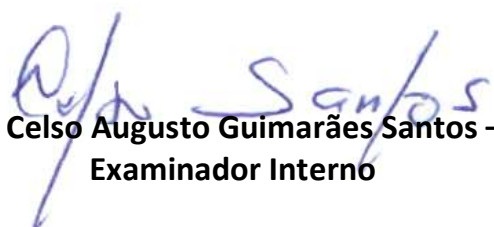
**VANINE ELANE MENEZES DE FARIAS**

**Dissertação aprovada em 05 de março de 2021**

**Período Letivo: 2020.2**



**Prof. Dr. Richarde Marques da Silva – UFPB**  
**Orientador**



**Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB**  
**Examinador Interno**



**Prof. Dr. José Yure Gomes dos Santos – UFRN**  
**Examinador Externo**

**João Pessoa/PB  
2021**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, saúde e coragem para ir em busca dos meus objetivos.

Aos meus pais, Eloise Elane e Wellington Farias, por todo amor, toda força e por darem tudo o que podem por minha educação e meu sucesso. Que são meu porto seguro e nunca mediram esforços para realizar meus sonhos e me fazerem alçar voos cada vez mais altos. Eu amo vocês tanto, que nem cabe aqui. Pai, nada me faz mais feliz do que ainda te ter aqui comigo, me vendo concluir mais essa etapa e torcendo pelas próximas. Quanto susto nesses últimos dois anos. Todas as minhas conquistas e tudo que eu sou não seria o mesmo sem você junto de mim. Aos meus irmãos Alexandre e Pablo, por tudo.

Ao meu orientador, professor Richarde Marques, por todo apoio desde a graduação. Pelos ensinamentos, pela paciência e por acreditar que no fim eu daria conta. Obrigada pela oportunidade de fazer parte do laboratório e por toda experiência que adquiri ao longo desses anos. Aos professores Celso Augusto e José Yure por aceitarem fazer parte da banca avaliadora e por todas as contribuições dadas.

Aos colegas do mestrado, que foram fundamentais em todo esse processo. Foi bom conhecer cada um de vocês. Mesmo a pandemia nos mantendo distantes fisicamente, não teria sido o mesmo sem o apoio de vocês. Especialmente Cinthia e Carol que foram parceiras para eu conseguir chegar até aqui. Que deram cabimento as minhas longas conversas, aguentaram juntas os dramas acadêmicos, os choros e também compartilharam comigo tantos momentos felizes, de coragem e de realizações. Vocês são massa. Sempre é tudo melhor com a gente se apoiando.

Aos colegas do LEPPAN, por estarem junto por todos esses anos. Vou sentir falta de vocês. Obrigada por me acolherem, por toda a ajuda que me deram, pelo apoio, pelo lanche da tarde de sempre. É gratificante olhar para trás e ver esse laço que criamos e toda essa ajuda que vocês sempre me deram. Em especial para Alexandro e Jorge que, nesse tempo difícil, entre muitas chamadas remotas e aperreios meus, me ouviram e me ajudaram a fazer a pesquisa andar. E quando precisei recalcular a rota na reta final, me ajudaram demais a sair do canto e seguir. Obrigada, obrigada.

E a todos os demais amigos e familiares que direta ou indiretamente me ajudaram a chegar até aqui. Obrigada por acreditarem e pelas confianças em mim depositadas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ pelo suporte financeiro concedido.

## RESUMO

O efeito que diferentes resoluções espaciais de modelos digitais de elevação (MDE) têm sobre a simulação do escoamento superficial ainda são pouco conhecidas, sobretudo em ambiente semiárido. Este estudo tem como objetivo analisar a influência que diferentes resoluções espaciais de MDE (de 30 a 1500 m) e fontes de obtenção (SRTM, ALOS, ASTER) exercem sobre as previsões de vazão no modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool+* (SWAT+), para a bacia hidrográfica do Rio Taperoá, no estado da Paraíba. O SWAT+ é uma versão completamente revisada do modelo SWAT e vem sendo aplicado para estimar os processos hidrossedimentológicos em diversas bacias, onde a topografia do terreno pode ter grande influência nas variáveis simuladas do modelo, sobretudo, na região semiárida do Nordeste do Brasil que se caracteriza pela ocorrência de eventos extremos de chuva e vazão. Os resultados mostram que as resoluções espaciais do MDE influenciam na representação topográfica e na extração da rede de drenagem, onde quanto mais alta a resolução, mais delineados são seus contornos, maior o número de sub-bacias e de unidades de respostas hidrológicas. Quanto as fontes de MDE, todos apresentaram comportamento semelhante na discretização da bacia hidrográfica. É possível observar que as diferenças que as resoluções do MDE causam na discretização da bacia influenciam na simulação do escoamento superficial. O modelo apresentou resposta para cada evento de chuva que gerou escoamento e as resoluções influenciam principalmente nas vazões de pico. Para as simulações utilizando as resoluções mais altas, o modelo tende a superestimar a vazão e, para as resoluções mais baixas, a vazão de pico tende a ser subestimada. Os valores de  $R^2$  são considerados bons e muito bons, variando de 0,89 a 0,75, a medida em que a resolução vai decrescendo. Os valores do NS foram insatisfatórios para as resoluções mais altas (30 a 500m), variando de 0,31 a 0,45, que apresentaram uma superestimação dos picos de vazão. Para os demais (800 e 1500 m), foi considerado satisfatório, variando de 0,5 a 0,52, que apresentaram um melhor ajuste do hidrograma. Quanto as fontes SRTM, ALOS e ASTER, as simulações apresentaram comportamento semelhante na estimativa da vazão, com hidrogramas parecidos e índices estatísticos aproximados, sendo o  $R^2$  muito bom de 0,89 e um NS insatisfatório de 0,26 a 0,31.

**Palavras-chave:** SIG; sensoriamento remoto; MDE; modelagem hidrológica; Semiárido.

## ABSTRACT

The effect that different spatial resolutions of digital elevation models (DEM) have on the simulation of surface flowing off are still poorly known, especially in a semiarid environment. This study aims to analyze the influence that different spatial resolutions of MDE (30 to 1500 m) and sources of obtainment (SRTM, ALOS, ASTER) perform on the outflow forecasts in the hydrological model Soil and Water Assessment Tool + (SWAT +), for the hydrographic basin of the Taperoá river, in the state of Paraíba. SWAT + is a completely revised version of the SWAT model and has been applied to estimate hydrosedimentological processes in several basins, where the topography of the terrain can have a great influence on the simulated variables of the model, especially in the semi-arid region of Northeast Brazil that is characterized by the occurrence of extreme rain and outflow events. The results show that the spatial resolutions of the MDE influence the topographic representation and the extraction of the drainage network, where the higher the resolution, the more outlined are its contours, the greater the number of sub-basins and hydrological response units. As for the sources of MDE, all presented similar behavior in the discretization of the hydrographic basin. It is possible to observe that the differences that the MDE resolutions cause in the discretization of the basin influence the simulation of the flow. The model presented an answer for each rain event that generated flow and the resolutions mainly influence peak outflows. For simulations using the highest resolutions, the model tends to overestimate the outflow and, for the lower resolutions, the peak outflow tends to be underestimated. The values of  $R^2$  are considered good and very good, varying from 0.89 to 0.75, as the resolution decreases. NS values were unsatisfactory for the highest resolutions (30 to 500m), varying from 0.31 to 0.45, which showed an overestimation of the peak flow. For the others (800 and 1500 m), it was considered satisfactory, ranging from 0.5 to 0.52, which showed a better adjustment of the hydrogram. As for the SRTM, ALOS and ASTER sources, the simulations showed similar behavior in the flow estimation, with similar hydrograms and approximate statistical indexes, with a very good  $R^2$  of 0.89 and an unsatisfactory NS from 0.26 to 0.31.

**Keywords:** GIS; remote sensing; MDE; Hydrological modeling; Semiarid.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Mapa de localização da bacia do rio Taperoá.....                                                                               | 27 |
| Figura 2 - Médias pluviométricas na bacia do rio Taperoá .....                                                                            | 28 |
| Figura 3 - Fluxograma das etapas de execução do modelo .....                                                                              | 33 |
| Figura 4 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia .....                                                                                  | 36 |
| Figura 5 - Distribuição espacial dos tipos de solo existentes na bacia do rio Taperoá .....                                               | 37 |
| Figura 6 - Delimitações da bacia derivadas de quatro resoluções de MDE: a) SRTM 30 m; b) SRTM 500 m; c) SRTM 1000 m; d) SRTM 1500 m ..... | 47 |
| Figura 7 - Delimitações da bacia derivadas de três fontes de MDE: a) SRTM 30 m; b) ALOS 30 m; c) ASTER 30 m; .....                        | 50 |
| Figura 8 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas na bacia sob diferentes resoluções espaciais de MDE. ....                         | 51 |
| Figura 9 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas na bacia quando simuladas para as resoluções de 30 m e 1500 m .....               | 52 |
| Figura 10 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas na bacia quando simuladas diferentes fontes de obtenção do MDE.....              | 54 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Atualizações do modelo SWAT+ .....                                                                 | 24 |
| Tabela 2 – MDEs utilizados nesta pesquisa .....                                                               | 34 |
| Tabela 3 – Associação entre o uso e ocupação do solo na bacia com as classes do banco de dados do SWAT+ ..... | 37 |
| Tabela 4 – Caracterização dos tipos de solo da bacia.....                                                     | 37 |
| Tabela 5 – Postos pluviométricos inseridos na bacia do Taperoá .....                                          | 38 |
| Tabela 6 – Postos fluviométricos inseridos na bacia do Taperoá.....                                           | 40 |
| Tabela 7 – Parâmetros climatológicos para bacia do rio Taperoá .....                                          | 41 |
| Tabela 8 – Classificação da eficiência da modelagem .....                                                     | 44 |
| Tabela 9 – Parâmetros modificados do modelo .....                                                             | 45 |
| Tabela 10 – Características dos rios para cada produto de MDE.....                                            | 46 |
| Tabela 11 – Características da bacia hidrográfica para cada produto de MDE.....                               | 48 |
| Tabela 12 – Características da rede de drenagem para cada fonte de MDE .....                                  | 49 |
| Tabela 13 – Características da bacia hidrográfica para cada fonte de MDE.....                                 | 50 |
| Tabela 14 – Coeficientes estatísticos das simulações de vazão com diferentes resoluções de MDE. ....          | 51 |
| Tabela 15 – Coeficientes estatísticos das simulações de vazão com diferentes fontes de obtenção do MDE. ....  | 54 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |                                                                            |
|---------|----------------------------------------------------------------------------|
| ALOS    | <i>Advanced Land Observing Satellite</i>                                   |
| ANA     | Agência Nacional de Águas                                                  |
| ASR     | <i>Agricultural Research Service</i>                                       |
| ASTER   | <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>      |
| CFSR    | <i>Climate Forecast System Reanalysis</i>                                  |
| CNPA    | Centro Nacional de Previsão Ambiental                                      |
| CREAMS  | <i>Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems</i> |
| EMBRAOA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                                |
| EPIC    | <i>Erosion-Productivity Impact Calculator</i>                              |
| FAO     | <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>             |
| GLEAMS  | <i>Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems</i>      |
| HYDGRP  | Grupo hidrológico                                                          |
| JAXA    | <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>                                  |
| LSU     | Landscape Unit                                                             |
| MDE     | Modelo Digital de Elevação                                                 |
| METI    | Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão                      |
| MODIS   | <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>                       |
| NASA    | <i>National Aeronautics and Space Administration</i>                       |
| NIMA    | <i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>                             |
| NLAYERS | Número de horizontes                                                       |
| NRCS    | <i>Natural Resource Conservation Service</i>                               |
| NS      | Índice de eficiência de Nash e Sutcliffe                                   |
| SHE     | <i>Systeme Hydrologique Europeen</i>                                       |
| SIG     | Sistemas de Informações Geográficas                                        |
| SOL_ALB | Valores de albedo                                                          |
| SOL_AWC | Capacidade de água disponível no solo                                      |
| SOL_K   | Condutividade hidráulica                                                   |
| SOL_ZMX | Profundidade da Raiz                                                       |
| SRTM    | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>                                    |
| SWAT    | <i>Soil and Water Assessment Tool</i>                                      |
| SWRRB   | <i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i>                       |

|          |                                                            |
|----------|------------------------------------------------------------|
| TOPKAPI  | <i>Topographic Kinematic Approximation and Integration</i> |
| TOPMODEL | <i>Topographic Based Hydrological Model</i>                |
| URH      | Unidade de Resposta Hidrológica                            |
| USLE_K   | Fatores de erodibilidade                                   |
| WEPP     | <i>Water Erosion Prediction Project</i>                    |
| WXGEN    | Gerador climático do modelo SWAT                           |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|              |                                                                   |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|
| $SW_t$       | Quantidade final de água no solo (mm)                             |
| $SW_0$       | Quantidade inicial de água contida no solo no dia $i$ (mm)        |
| $R_{day}$    | Precipitação no dia $i$ (mm);                                     |
| $Q_{surf}$   | Escoamento superficial no dia $i$ (mm)                            |
| $E_a$        | Evapotranspiração no dia $i$ (mm)                                 |
| $W_{seep}$   | Quantidade de água que entra na zona vadosa no dia $i$ (mm)       |
| $Q_{gw}$     | Quantidade de fluxo de retorno no dia $i$ (mm)                    |
| $S$          | Capacidade máxima de armazenamento (mm)                           |
| $CN$         | Curva Número                                                      |
| $\lambda E$  | Densidade de fluxo de calor latente (MJ/m <sup>2</sup> /d);       |
| $\Delta$     | Declividade da curva da pressão-temperatura do valor de saturação |
| $H_{net}$    | Rede de radiação (MJ/m <sup>2</sup> /d);                          |
| $G$          | Densidade do fluxo de calor para o solo (MJ/m <sup>2</sup> /d)    |
| $\rho_{air}$ | Densidade do ar (kg/m <sup>3</sup> )                              |
| $C_p$        | Calor específico em pressão constante (MJ/Kg °C)                  |
| $e_z^0$      | Pressão do valor de saturação de ar na altura $z$ (kPa)           |
| $e_z$        | Pressão do vapor de água de ar na altura $z$ (kPa)                |
| $\gamma$     | constante psicrométrica (kPa/°C)                                  |
| $r_c$        | Resistência do dossel de planta (s/m)                             |
| $r_a$        | Resistência de difusão da camada de ar (s/m)                      |
| $P_x$        | Precipitação no posto pluviométrico (mm)                          |
| $M_x$        | Média aritmética das precipitações do posto com falha             |
| $M_a$        | Média aritmética das precipitações dos postos vizinhos            |

# Sumário

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                  | <b>12</b> |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>                                                   | <b>15</b> |
| Objetivo geral .....                                                        | 15        |
| Objetivos específicos .....                                                 | 15        |
| <b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                         | <b>16</b> |
| 3.1 Região semiárida .....                                                  | 16        |
| 3.2 Processos hidrológicos .....                                            | 16        |
| 3.3 Modelos Digitais de Elevação .....                                      | 18        |
| 3.4 Modelos hidrológicos .....                                              | 20        |
| 3.4.1 Sensoriamento Remoto e SIG aplicados à Modelagem Hidrológica .....    | 22        |
| 3.5 Atualizações do modelo SWAT+ .....                                      | 23        |
| 3.5.1 Aplicações do SWAT+ .....                                             | 25        |
| 3.5.2 Sensoriamento Remoto e SIG aplicados à Modelagem Hidrológica .....    | 15        |
| <b>4. METODOLOGIA .....</b>                                                 | <b>27</b> |
| 4.1 Caracterização da área de estudo .....                                  | 27        |
| 4.2 Modelo SWAT+ .....                                                      | 29        |
| 4.2.1 Descrição do Modelo SWAT+ .....                                       | 30        |
| 4.3 Etapas de execução do modelo .....                                      | 32        |
| 4.3.1 Elaboração do banco de dados .....                                    | 33        |
| 4.3.1.1 Modelos Digitais de elevação .....                                  | 34        |
| 4.3.1.2 Tipos de solo e uso e ocupação do solo .....                        | 35        |
| 4.3.1.3 Dados climatológicos e fluviométricos .....                         | 38        |
| 4.3.1.4 Parâmetros climáticos .....                                         | 40        |
| 4.3.2 Análise morfométrica .....                                            | 41        |
| 4.3.2.1 Delimitação da bacia e extração da rede de drenagem .....           | 41        |
| 4.3.3 Modelagem hidrológica .....                                           | 42        |
| 4.3.4 Análise de desempenho do modelo .....                                 | 43        |
| 4.3.5 Ajustes dos parâmetros .....                                          | 44        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                      | <b>46</b> |
| 5.1 Impacto na topografia e nas características da bacia hidrográfica ..... | 46        |
| 5.2 Modelagem hidrológica .....                                             | 50        |
| 5.2.1 Estimativa de vazão .....                                             | 50        |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                        | <b>56</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                    | <b>59</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

A influência que diferentes resoluções espaciais de modelos digitais de elevação (MDE) têm sobre a simulação do escoamento superficial e da produção de sedimentos no modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) ainda são pouco conhecidas, sobretudo em ambiente semiárido. A capacidade de um modelo hidrológico em escala de bacia hidrográfica simular com precisão os processos do ciclo hidrológico depende muito da qualidade dos dados de entrada (TAN et al., 2015). Em modelos hidrossedimentológicos distribuídos e acoplados ao Sistema de Informação Geográfica (SIG), os MDEs são uns dos dados de entrada mais importantes, a partir do qual se obtém a delimitação da bacia hidrográfica, todos os atributos topográficos da área de estudo, e toda a rede de drenagem.

Atualmente, pode-se ter acesso fácil e gratuito à MDEs gerados a partir de sensoriamento remoto orbital, no qual são obtidos por satélites na órbita da Terra (GADELHA et al., 2017). Dentre esses satélites/missões, pode-se destacar o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), que realizaram missões que mapearam grande parte da superfície terrestre em escala global e dão respaldo a muitos usuários pelo mundo, por serem produtos de alta confiabilidade e facilidade de acesso (SIMÕES, 2019). Produtos como esses são disponibilizados em plataformas digitais com diferentes resoluções espaciais e podem ser usados em estudos de modelagem hidrológica (NAZARI-SHARABIAN et al., 2019).

A precisão da utilização desses produtos de MDE na modelagem hidrológica pode variar de acordo com a resolução espacial e com os erros inerentes aos seus métodos de aquisição e processamento (NAGAVENI et al., 2019). Diferentes resoluções espaciais do MDE, bem como suas fontes de obtenção, têm efeito no traçado da rede de drenagem (SOUSA, 2016; HÖRMANN et al., 2012). Os comprimentos dos cursos d'água podem variar, assim como as elevações máximas e mínimas da área de estudo, alterando o número sub-bacias e de unidades de resposta hidrológica (HRU) no modelo. As diferenças que os dados da topografia do terreno causam na discretização da bacia hidrográfica podem influenciar na simulação da vazão e produção de sedimentos (MUNOTH e GOYAL, 2019; NAGAVENI et al., 2019). Além disso, a resolução espacial utilizada interfere no tempo de processamento do modelo e na capacidade do computador utilizado para as simulações.

Nesse sentido, analisar a topografia de uma região é uma etapa fundamental para a compreensão da hidrologia daquele local (GADELHA et al., 2017). Diante disso, analisar como a resolução do MDE pode afetar diretamente nas previsões de um modelo hidrológico atraiu a

atenção de diversos pesquisadores que buscaram entender a influência exercida pela topografia em processos físicos da bacia, como escoamento superficial, produção de sedimentos e transporte de nutrientes (HAMEL et al., 2017; CHAPLOT, 2014; ZHANG et al., 2016; CUI et al., 2014; ROOSTAEE e DENG, 2020). Tais estudos demonstraram como os resultados dos modelos hidrológicos são influenciados pela resolução espacial, pela fonte de obtenção e pelas técnicas de reamostragem do MDE. Estudos sobre a influência do MDE no modelo SWAT vêm sendo testados em diversas partes do planeta (NAZARI-SHARABIAN et al., 2019; TAN et al., 2015; XU et al., 2016; WU et al., 2017; ZHANG et al., 2014). Em todos os estudos destacados, os autores ressaltaram que o MDE apresentou influência nas variáveis simuladas de escoamento superficial, produção de sedimentos e transporte de nutrientes.

A modelagem é uma ferramenta muito aplicada em estudos hidrossedimentológicos. Conhecer como as resoluções espaciais dos produtos de elevação influenciam nos atributos topográficos e nas estimativas do modelo pode trazer melhores resultados para estudos nessa região. O semiárido é um local que tem como característica a irregularidade pluviométrica espacial e temporal, com secas bastante frequentes, o que influencia diretamente no escoamento superficial e produção de sedimentos das bacias hidrográficas (SANTOS et al., 2011; SRINIVASAN e PAIVA, 2009). Para estudar a dinâmica hidrológica do local, é importante conhecer os processos físicos hidrológicos e sedimentológicos que estão envolvidos a nível de bacia hidrográfica. Modelos de vazão e erosão são ferramentas muito utilizadas por gestores da área de recursos hídricos, engenheiros e cientistas para entender esses fenômenos e dar subsídio no processo de gestão dos recursos hídricos (KALIN e HANTUSH, 2006).

Diante disso, a modelagem hidrológica se apresenta como uma forma de compreender e estimar o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas do semiárido. Com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas, é possível realizar análises mais complexas na área de estudo, com uma melhor representação espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia, cruzando informações espaciais de topografia, tipos de solo e uso e ocupação do solo com informações climatológicas e parâmetros físicos medidos em diferentes pontos, de forma rápida e eficiente (UZEIKA, 2009; SILVA e SANTOS, 2008; TUCCI 1998).

Para isso, existem diversos modelos hidrológicos distribuídos que estão disponíveis ao uso, como a nova versão do *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), o SWAT+, uma versão completamente reestruturada do modelo SWAT, desenvolvida para atender aos desafios futuros na modelagem de recursos hídricos e atender às necessidades da crescente comunidade mundial de usuários (BIEGER et al. 2017), que vem começando a ser utilizado em diversos estudos de

bacias hidrográficas pelo mundo, apresentando resultados satisfatórios de aplicação. Embora o SWAT+ seja uma versão atualizada do SWAT, pouco se conhece da influência que os produtos de MDE apresentam nessa versão modificada para o modelo agora baseado em *grid* e com diferente discretização quando comparado ao formato antigo do modelo.

Nesse contexto, este estudo almeja que os resultados encontrados também podem ser úteis para serem aplicados a outras bacias hidrográficas hidrologicamente semelhantes.

Este trabalho de dissertação está dividido em seis partes. Inicialmente apresenta uma breve introdução do tema e sua justificativa, seguido da apresentação do objetivo geral do estudo e seus objetivos específicos no segundo item. Uma revisão bibliográfica é apresentada, contendo os principais conteúdos que embasam este estudo, como uma sucinta descrição dos processos hidrosserimentológicos em uma bacia, conceitos sobre os modelos hidrológicos e suas aplicações, a apresentação do modelo SWAT+ e suas atualizações, além de uma abordagem sobre modelos digitais de elevação. A etapa seguinte aborda a metodologia aplicada neste estudo, que apresenta as formas de obtenção e processamento dos dados de entrada e o processo de simulação. É também a caracterização da área de estudo, descrevendo todos os aspectos da bacia. Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos para cada etapa desenvolvida e é feita a discussão de como os MDEs influenciam na estimativa do modelo SWAT+ ao simular escoamento superficial em uma bacia do semiárido. Por fim, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar a influência que diferentes resoluções espaciais de MDE exercem sobre a modelagem hidrológica em uma bacia do semiárido.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o impacto do uso de diferentes MDEs nos atributos topográficos e na discretização da bacia do Rio Taperoá.
- Comparar o desempenho do SWAT+ na simulação da vazão para produtos com diferentes resoluções espaciais.
- Identificar se dados topográficos obtido por diferentes fontes influenciam na estimativa de vazão no SWAT+.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Região semiárida**

Em regiões de climas tropicais e semiáridos, ocorrem irregularidades na distribuição pluviométrica, com um regime de precipitações concentradas em um curto período de tempo e na maior parte do ano exposto a forte insolação e elevado déficit hídrico, o que interfere diretamente no escoamento superficial e na produção de sedimentos das bacias hidrográficas da região (SILVA et al., 2012; ARAÚJO et al., 2005).

Os recursos hídricos da região semiárida brasileira são geralmente afetados por essas precipitações extremas em um curto intervalo de meses, bem como as secas prolongadas, que podem interferir no equilíbrio do ecossistema (JUNIOR e MONTENEGRO, 2018). Por outro lado, têm-se também a erosão do solo pela água como um dos processos de degradação ambiental mais significativos. A erosão pode eliminar a camada superficial do solo, a qual é rica em matéria orgânica, reduzir a capacidade produtiva das culturas, causar assoreamento e poluição das fontes de água (BARBOSA NETO et al., 2017; SANTOS et al., 2011).

No semiárido nordestino, região em que grande parte da população e o desenvolvimento regional dependem de atividades econômicas ligadas à agricultura e a pecuária extensiva, têm sido realizados diversos estudos por pesquisadores e órgãos que percebem a influência desse aspecto nas questões socioeconômicas e físicas locais (SANTOS et al., 2007; SILVA et al. 2012). Essas são práticas que contribuem para o desmatamento e deixam a área mais suscetíveis a erosão, podendo levar a processos erosivos mais severos e aumentar o processo de desertificação. Dessa forma, para atender a demanda dos recursos hídricos da região, o semiárido precisa gestão e planejamento permanente das bacias hidrográficas. E por causa desses extremos climáticos e dos intermitentes cursos d'água, a compreensão dos processos hidrológicos é uma prioridade para sua preservação (JÚNIOR e MONTENEGRO, 2019).

Sendo assim, a utilização de modelos hidrológicos e sedimentares podem ser uma ferramenta chave para que se torne possível compreender de forma mais clara a dinâmica hidrológica da região e pode contribuir para a análise espacial desses processos físicos em pesquisas científicas.

#### **3.2 Processos hidrológicos**

A utilização de modelos hidrossedimentológicos em estudos ambientais permite a simulação dos processos que ocorrem nos ciclos hidrológicos e sedimentares de uma bacia

hidrográfica. Para compreender o sistema a ser modelado, é importante conhecer cada etapa desses ciclos. O entendimento das relações entre os fatores que causam a perda de água e do solo nas bacias hidrográficas são importantes para o planejamento eficaz da gestão dos recursos hídricos da região de estudo. Fontes Júnior e Montenegro (2019) discutem que no semiárido brasileiro os recursos hídricos sofrem influência e são afetados diretamente por eventos extremos de precipitação e secas prolongadas, fatores que interferem no equilíbrio do ecossistema. O conhecimento hidrológico do local é aplicado para o estudo desses eventos e para o controle dos recursos hídricos.

O ciclo hidrológico é um processo dinâmico de circulação da água entre a superfície da terra e da atmosfera, constituído por diferentes fases (PINTO et al., 1976), a de evaporação, precipitação, infiltração, percolação e escoamento. Como mostrado por Naghettini (2012), que descreve cada um desses processos, a precipitação pode ser adotada como a etapa inicial do ciclo, que inclui todos os processos pelos quais a água proveniente do vapor de água da atmosfera cai na superfície terrestre, seja como chuva, neve, neblina, geada ou granizo. Parte dessa água fica retida na vegetação e não atinge o solo, no qual a esse armazenamento dá-se o nome de interceptação vegetal, em que sua maior parte retorna a atmosfera sob a forma de vapor. A porção de água que precipita e atinge o solo, pode infiltrar para o subsolo, deixando parte retida nos poros nas camadas superiores do solo e pode formar o escoamento subsuperficial. A processo de percolação consiste no movimento da água no perfil do solo e ocorre quando essa água infiltrada percola de forma rasa alimentando os corpos d'água superficiais ou profundos, onde a água é conduzida para as camadas mais profundas, atingindo os aquíferos. Quando a chuva exceder a capacidade máxima de infiltração do solo, esse excesso forma o escoamento superficial, que é o deslocamento da água na superfície, podendo ser superficial ou subsuperficial, responsável pela origem dos córregos, lagos, rios e, eventualmente, alcança o mar (UZEIKA, 2009). O ciclo hidrológico se completa pelo retorno da água à atmosfera pelas plantas, pelo solo e pelas superfícies líquidas sob forma de vapor de água. Quando essa mudança de fase tem origem em superfícies líquidas, como a partir de oceanos, lagos e rios, embora os solos também contribuam para esse volume, dá-se o nome de evaporação simplesmente. A planta, por sua vez, tem a capacidade de absorver a água que está retida nas camadas superiores do solo através de seu sistema radicular, utilizando-a em seu processo de crescimento. O processo de perda de água pelas plantas é a fase chamada de transpiração, onde a vegetação devolve para a atmosfera a água que absorveram do solo. O

conjunto de ambos os processos de evaporação da água seja dos corpos hídricos ou da transpiração pela vegetação, é denominado evapotranspiração (NAGHETTINI, 2012).

A vista disso, a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica tende a transportar tanto água como sedimentos, o que pode causar alguns impactos negativos para a região, visto que tem influência direta na degradação e na fertilidade do solo e que também pode afetar a qualidade do leito dos rios e dos ecossistemas fluviais e estuarinos. Para estudar e compreender a dinâmica esses processos nas bacias hidrográficas, os modelos hidrolóssedimentológicos são ferramentas bastante utilizadas.

### **3.3 Modelos Digitais de Elevação**

Informações a respeito do relevo são de grande importância para estudos voltados a engenharia de recursos hídricos. Atualmente, os dados de elevação do terreno podem ser obtidos de variadas formas, como a partir de levantamentos topográficos realizados em campo, por meio de métodos fotogramétricos aplicados sobre imagens provenientes de sensores terrestres, aerotransportados ou orbitais óticos e por dados de radar e LiDAR - *Light Detection And Ranging* (OLIVEIRA et al., 2017).

Os dados obtidos são dispostos na forma de Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Elevação (MDE). As superfícies digitais têm como objetivo representar superfícies contínuas de forma discreta a partir de uma quantidade finita de amostras e podem ser representadas matematicamente e graficamente. De acordo com Oliveira e Tommaselli (2012), essas representações do relevo são mais comuns nas formas de grades regulares ou as grades irregulares. O MDE é o termo geral para representar qualquer dado de elevação da superfície terrestre. Mendonça et al. (2018) define o MDS como a representação completa da altimetria de uma região observada, o qual obtém todas as representações da superfície, como vegetação e edificações. Os MDT são representação do comportamento do relevo em uma área da superfície terrestre, todavia, não consideram alvos que se localizam acima do terreno, como as feições antrópicas e vegetação.

Os modelos digitais de elevação (MDE) provenientes do sensoriamento remoto têm sido a principal fonte de dados de elevação da superfície terrestre, muito utilizada na caracterização e modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e são amplamente aplicados em uma variedade de estudos (MORAIS e SALES, 2016). Na modelagem hidrológica, por exemplo, os MDEs são comumente utilizados como um dos principais dados de entrada para a criação das

redes de fluxo e delimitação da bacia hidrográfica de estudo (ROOSTAEE et al., 2018), devido sua eficiência de representar a variabilidade espacial da superfície da Terra (ZHAO et al., 2009).

As técnicas de sensoriamento remoto têm evoluído nas últimas décadas, possibilitando o aprimoramento da produção cartográfica em diferentes escalas e precisões (SIMÕES, 2019). Atualmente, existe uma diversidade de produtos de MDE, com distintas características de processamento e formas de aquisição (SILVEIRA, 2015).

O produto *Shuttle Radar Topography Mission* – (SRTM) é um dos mais conhecidos e utilizados, foi o primeiro sensor, lançado em 2000, a produzir o mais completo mapeamento da topografia terrestre até então. Os produtos oriundos do SRTM ainda dão respaldo a maioria dos usuários, devido sua confiabilidade e a facilidade de acesso e obtenção (SIMÕES, 2019). O modelo de superfície digital global AW3D30 é um conjunto de dados global gerado a partir de imagens coletadas usando o instrumento de sensoriamento remoto pancromático para mapeamento estéreo (PRISM) a bordo do satélite de observação terrestre avançado *Advanced Land Observing Satellite* - ALOS de 2006 a 2011. Outros produtos muito utilizados em estudos ambientais e derivados de diferentes sensores orbitais, desenvolvidos por iniciativas de agências internacionais para o interesse civil, governamental e militar, são o ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*) e o WorldDem da missão TandemX Mission (*Terra SAR-X add-on for Digital Elevation Measurements*).

Uma modelagem pode gerar resultados significativamente diferente devido às incertezas causadas por essas distintas resoluções na geração dos fluxos de drenagem (ROOSTAEE et al., 2018). Moreira (2012), aponta que uma das principais dificuldades de utilizar um modelo digital de elevação para caracterizar uma rede de drenagem fluvial é a possível discordância entre o traçado da hidrografia mapeado a partir desse produto em relação a rede de drenagem natural da paisagem. Garbrecht et al. (2001), discutem que isso pode advir em decorrência de características mais detalhadas e algumas variações topográficas presentes na superfície nem sempre serem bem representadas no MDE, devido às limitações do próprio produto e do sensor. Dessa forma, dependendo do objetivo de estudo, o conhecimento quanto à qualidade da rede de drenagem derivada do processamento do MDE é um fator importante, visto que uma má representação da mesma pode acarretar dificuldade para o desenvolvimento da pesquisa.

Alguns pesquisadores já estudaram os impactos que os MDEs podem ter em modelagens hidrossedimentológicas. Tan et al. (2015) comparou as estimativas de fluxo do modelo SWAT na bacia do rio Johor, Malásia, para MDEs com diferentes resoluções, fontes de obtenção e

técnicas de reamostragem e observou que a resolução do MDE influencia mais nas simulações de fluxo dentro do modelo em comparação com a fonte de obtenção e as técnicas de reamostragem. Liu et al. (2014) e Xu et al. (2016) buscaram compreender a sensibilidade do SWAT para diferentes resoluções de MDEs, variando de 30 a 1000 m, na bacia hidrográfica do rio Xiangxi, na China. O primeiro estudo observou que a previsão da carga de oxigênio dissolvido e produção de sedimentos foram afetadas pelas diferentes resoluções, enquanto as cargas de fósforo, azoto e nitrogênio amoniacal foram minimamente afetados. Todavia, o segundo estudo observou que as resoluções de 1000 m subestimaram a declividade quando comparado a resoluções mais baixas de 30 m, o que influenciou na quantidade de HRUs e refletiu no cálculo da carga total de nitrogênio total e fósforo.

Reddy e Reddy (2015) avaliaram a influência das diferentes resoluções espaciais do MDE no escoamento e produção de sedimentos na bacia hidrográfica de Kaddam, na Índia. Pôde-se observar que a variação dos MDEs modificou algumas características da bacia, o que influenciou no número de sub-bacias e HRUs e resultou em uma variabilidade de produção diária de escoamento e sedimentos. Wu et al. (2017) avaliou a influência de três resoluções espaciais do MDE SRTM na extração da rede de drenagem feita pelo modelo SWAT em 10 regiões de bacias hidrográficas da China, observando que o MDE influencia quando se calcula o valor da área acumulada de drenagem, de forma que quanto maior a resolução, maior a variabilidade dos valores para bacias com densidades mais baixas.

Por fim, deve-se destacar que na literatura consultada, não foi encontrado artigo voltado para a análise do impacto dos MDEs, como dado de entrada da topografia, na simulação de escoamento superficial em estudos do ambiente semiárido, para o a nova versão do modelo SWAT+ e suas atualizações.

### **3.4 Modelos hidrológicos**

Os modelos hidrológico são ferramentas computacionais que se baseiam em equações matemáticas para reproduzir os efeitos dos principais agentes ambientais na estimativa dos componentes dos processos hidrológicos e erosivos de uma bacia hidrográfica (UZEIKA, 2009). Existem inúmeros modelos hidrológicos disponíveis ao uso. Muitos são desenvolvidos para uma mesma finalidade, diferenciando-se por questões conceituais ou em função dos dados utilizados, pelas escalas temporais e espaciais nas quais operam os processos que representam, e pela sua discretização. Lima (2010) aponta que, para escolher o modelo apropriado, deve-se levar em consideração o objetivo do estudo e o que se deseja extrair do modelo; quais os dados

necessários para a modelagem e quais os dados disponíveis para sua execução; qual a precisão requerida e o grau de capacitação do corpo técnico para se utilizar e interpretar as informações de saída do modelo; o tempo necessário e se tem equipamentos com capacidade suficiente de processamento.

Os modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos podem ser classificados a partir de diferentes aspectos, como discutem Rennó e Soares (2000) e Christofolletti (1999). Os modelos podem ser físicos, que tentam representar os processos físicos observados no mundo real; ou matemáticos, que representam os fenômenos da natureza por meio de equações. Se os tipos de variáveis utilizadas são determinísticos, que determinam os resultados idênticos a partir das mesmas condições de entrada; ou estocásticos, que não respondem a uma distribuição específica e incorpora elementos probabilísticos, onde os resultados são expressos em termos de probabilidade. Se as relações dessas variáveis são empíricas, que tem correlações observadas no comportamento real das bacias hidrográficas para desenvolver métodos empíricos, em geral recorrendo a algoritmos simples; ou conceituais, que buscam descrever todos os processos que estão envolvidos no fenômeno estudado. Se os dados são representados de forma discreta, em que é feita por evento, quando se tem a modelagem de períodos isolados da série, normalmente buscando representar eventos de cheia ou recessão; ou contínua, que buscam representar longos períodos da série, muitas vezes, contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes. Se a relação espacial é pontual ou distribuída, e quanto a existência de dependência temporal sendo estáticos ou dinâmicos. Um mesmo processo a ser modelado pode ser representado de diferentes maneiras e utilizando diferentes modelos hidrológicos, não existindo um modelo único que seja melhor aplicado e sim pode existir aquele que melhor descreve um fenômeno de acordo com o objeto de estudo.

Atualmente, diversos modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos estão disponíveis ao uso e vem sendo utilizados para simulação em bacias de pequenas, médias e de grande porte. Os modelos se diferenciam por seus diferentes processamentos e finalidades. Dentre os mais conhecidos para hidrologia estão o *Systeme Hydrologique Europeen* – SHE (ABBOTT et al., 1986), o *Topographic Kinematic Approximation and Integration* – TOPKAPI (LIU e TODINI, 2002), *Arno River Model* – ARNO (TODINI, 1996), o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB-IPH (COLLISSCHONN et al., 2010), o *Topographic Based Hydrological Model* – TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979). Muitos desses modelos foram desenvolvidos por grupos de pesquisas com a finalidade de obter modelos distribuídos que agregassem as melhores formulações para representar cada fase do ciclo hidrológico (KAISER, 2006). Para a

modelagem da erosão hídrica, existe o *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System* – CREAMS (KNISELI, 1980), o *Water Erosion Prediction Project* – WEPP (FLANAGAN e NEARING, 1995), o *Kinematic Erosion Model* – Kinneros (WOOLHISER et al., 1990) e o *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT (ARNOLD et al., 1998). Os modelos hidrológicos integrados a um software de SIG permitem que os estudos sejam feitos com uma análise espaço-temporal e consideram a variabilidade espacial para cada parâmetro e dado de entrada, permitindo que a pesquisa seja feita com maior precisão.

O modelo SWAT possui uma versão completamente revisada, o SWAT+, que é um modelo hidrossedimentológico de base física, semi-distribuído, contínuo no tempo e com uma interface acoplada a um SIG que tem sido muito estudado e difundido mundialmente, apresentando resultados satisfatórios de aplicação (ARNOLD et al., 2012; GASSMAN et al., 2007). O modelo permite analisar o efeito do uso e ocupação do solo sobre escoamento superficial, qualidade da água e produção de sedimentos, permitindo maior agilidade e facilidade na organização e o seu uso (FERRIGO, 2014).

O modelo hidrológico integrado com o SIG é uma ferramenta capaz de realizar análises mais complexas de uma bacia hidrográfica levando em consideração a variabilidade no tempo e no espaço e determinar parâmetros hidrológicos a partir da utilização conjunta de imagens como das características da cobertura do solo, do Modelo Digital de Elevação, informações climatológicas medidas em diferentes pontos da bacia e gerar, assim, resultados mais satisfatórios do que se aplicando técnicas de maneira separada. Para Christofolletti (1999), a espacialidade é uma característica inerente aos sistemas ambientais, o que ressalta a significância dos sistemas de informação geográfica para os procedimentos da modelagem. A análise da vazão e produção de sedimentos pelo SWAT+ permite a entrada de dados específicos para características da região em diferentes pontos da bacia, permite estudar o comportamento desses fatores e elaborar mapas a partir dos resultados gerados na modelagem, espacializando a vazão e produção de sedimentos e analisando a influência de todos os fatores climatológicos e de mudança no solo sobre o processo hidrológico.

#### **3.4.1 Sensoriamento Remoto SIG aplicados à modelagem hidrológica**

O geoprocessamento engloba tecnologias de tratamento e manipulação de dados geográficos por meio de programas computacionais e utilização de sensoriamento remoto, sistemas de posicionamento global e sistemas de informações geográficas (SANTOS, 2020). Essas geotecnologias têm ganhado papel de destaque em diversos campos do conhecimento,

possibilitando uma diversidade de opções de produtos a serem extraídos a partir do sensoriamento remoto e processados em ambiente SIG (NUNES, 2018).

Produtos oriundos de sensoriamento remoto têm se destacado pelas suas crescentes contribuições para o monitoramento contínuo e representativo de variáveis hidrológicas em grandes bacias hidrográficas (OLIVEIRA, 2020). Pode ser utilizado para o monitoramento de variáveis como precipitação, evapotranspiração, umidade do solo e altimetria. O sensoriamento remoto e o SIG apresentam um grande potencial de aplicação nos trabalhos com modelagem. Ao associá-los com modelos hidrológicos, por exemplo, tornam-se uma ferramenta capaz de realizar análises mais complexas em bacias hidrográficas, levando em consideração a variabilidade dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia e dos parâmetros que a caracterizam, seja no tempo e no espaço. Sua larga cobertura espacial e temporal são vantagens e potencialidades, no qual este monitoramento remoto é de grande relevância em regiões com escassez de dados (SIVAPALAN et al., 2003). O SIG pode ser utilizado para produção e elaboração dos mapas dos estudos hidrológicos; pode ser utilizado para analisar espacialmente fenômenos em uma região; e pode servir como um banco de dados geográficos, que pode armazenar e recuperar uma informação espacial (CÂMARA e MEDEIROS, 1998).

Através da classificação de imagens de satélite, por exemplo, pode-se analisar as mudanças da cobertura vegetal e do uso e ocupação da terra em uma determinada área e, junto a isso, prever os impactos causados pela ação antrópica, levando a um gerenciamento de bacias mais eficiente e eficaz (BALDISSERA, 2005). Letternmaier et al. (2015), aborda como o uso de sensoriamento remoto na hidrologia é um avanço na compreensão científica de processos hidrológicos, visto que a abordagem de estudos passa de uma escala experimental para uma escala de regional a global.

A integração dessas ferramentas é um ganho para o desenvolvimento de estudos ambientais e vem sendo utilizado extensivamente na área de planejamento e projetos de engenharia de recursos hídricos, tornando-se um elemento importante para o diagnóstico da situação ambiental e hídrica de uma bacia (BALDISSERA, 2005; CARVALHO NETO, 2011).

### **3.5 Atualizações do modelo SWAT+**

O SWAT é um modelo hidrossedimentológico bastante utilizado nos últimos anos, e que vem apresentando resultados satisfatórios de aplicação (BIEGER et al., 2019). Entre seus pontos fortes está a capacidade do mesmo de combinar processos de terra, como crescimento de plantas e detalhes gestão de terras, com processos de canal. Apresenta a possibilidade de

integração de vários processos ambientais e de poluentes. Tem seu código disponível publicamente para acesso e tem um bom suporte de modelo técnico. Além disso, dispõe de várias ferramentas de interface e outros softwares de suporte ao pré-processamento e pós-processamento de dados e construção, parametrização e calibração de modelos SWAT (BIEGER et al., 2017; GAUSSMAN et al., 2014).

Todavia, o SWAT passou por uma série de atualizações ao longo do tempo. Recentes aplicações do modelo apontavam uma série de modificações e melhorias ainda necessárias para aprimorar seus recursos e superar suas limitações (BIEGER et al., 2017). Uma limitação apresentada e bastante discutida entre os usuários, é por o modelo não conseguir contabilizar o transporte e processos de deposição na paisagem. Além disso, as modificações ao longo dos anos tornaram o código mais difícil de gerenciar e manter.

A mais recente atualização resultou no SWAT+, que se mostra mais flexível que a antiga versão SWAT em termos de representação espacial de interações e processos dentro de uma bacia hidrográfica. Embora permaneça os mesmos algoritmos básicos utilizados para calcular os processos hidrológicos do modelo, toda a estrutura e organização do código e dos arquivos de entrada foram modificados consideravelmente. Essas mudanças visam, principalmente, facilitar a manutenção do modelo e para futuras modificações do código, e melhor colaboração com outros pesquisadores para integrar novas ciências e módulos ao algoritmo do SWAT. As principais modificações que foram realizadas a partir das limitações apresentadas por diversos usuários ao redor do mundo podem ser vistas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Atualizações do modelo SWAT+.

| SWAT                                                                                                                                                        | SWAT+                                                                                                                                                                                                                                                | Vantagens do SWAT+                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias e em unidades de respostas hidrológicas (HRUs);                                                           | 1. Subdivide a bacia em sub-bacias e em cada uma faz a separação entre áreas de água e áreas de terra;<br>2. As áreas de água são definidas como lagoas/reservatórios;<br>3. Bacia com definição de unidades de paisagem (LSU) para agregar as HRUs; | 1. Simulação mais realista de áreas de água;<br>2. Melhora a simulação da posição da paisagem, roteamento terrestre e processos de inundação; |
| 1. Todas as HRUs não tem dimensões reais definidas e localizadas espacialmente dentro de uma única LSU durante o cálculo dos processos de fases terrestres; | 1. As HRUs são representadas por um campo de configuração com dimensões reais definidas pelo usuário;                                                                                                                                                | 1. Cálculo de processos da fase terrestre independente da área das HRU;                                                                       |

|                                                                                              |                                                                                                                           |                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Os aquíferos existentes são ligados às HRUs;<br>2. Definição de um aquífero por HRU;      | 1. Os aquíferos são independentes das HRUs;                                                                               | 1. Um número de aquíferos pode ser definido;<br>2. Facilidade de ligação com o SWAT-MODFLOW                                                                |
| 1. Todos os reservatórios existentes são inseridos no canal principal na saída da sub-bacia; | 1. Os reservatórios são colocados em qualquer lugar da bacia hidrográfica;                                                | 1. Representação mais realista da posição do reservatório e melhor interações com a paisagem;                                                              |
| 1. Layout variável para cada arquivo de saída;                                               | 1. Layout padronizado de arquivos de saída em formato de banco de dados;                                                  | 1. Melhor carregamento e edição dos dados de saída em qualquer editor de texto, planilha ou programa de banco de dados;                                    |
| 1. As alterações dos valores dos parâmetros são feitas nos arquivos de dados originais;      | 1. As alterações dos valores dos parâmetros podem ser feitas no arquivo de calibração que substitui os valores originais; | 1. Calibração rápida do modelo<br>2. Permite melhor rastreamento de parâmetros modificados                                                                 |
| 1. As conexões especiais da bacia são definidas e impressas em um único arquivo (fig.fig);   | 1. Um arquivo conectado por objeto espacial para definir hidrogramas de vazão, frações e objetos receptores;              | 1. Mais flexível na definição de interações espaciais de objetos dentro da bacia de alimentação;<br>2. Mais fácil de configurar modelos baseados em grade; |

Fonte: Arnold et al. (2017)

Junto com essas mudanças, Bieger et al. (2017), que apresentaram a nova versão do SWAT+ a comunidade científica, apresentam como a configuração conceitual das HRUs são diferentes da versão anterior do SWAT. Agora essas unidades de respostas hidrológicas são uma área contígua, com comprimento e largura, que influenciam no cálculo do escoamento e cargas de poluentes. Outro ponto importante é a possibilidade de agora adicionar objetos espaciais, como canais, bombas, rebanhos, direito de água, dando ao usuário novas possibilidades para melhorar a simulação dos usos antropogênicos da terra e dos recursos hídricos. Por fim, para facilitar o trabalho do usuário, todos os arquivos são de formato livre, de forma que podem ser facilmente abertos e editados em qualquer planilha ou editor de texto.

### 3.5.1 Aplicações do SWAT+

O SWAT tem se apresentado eficiente como uma ferramenta para compreender os fenômenos hidrológicos, analisar a influência das mudanças do clima e do uso solo sobre os recursos hídricos e a prever a vazão e produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Sua nova versão do SWAT+ tem começado a ser utilizado em estudo de bacias hidrográficas, apresentando resultados satisfatórios em suas aplicações.

No Brasil, estudos utilizando o SWAT+ como ferramenta ainda não foram publicados. Todavia, a versão anterior do modelo foi aplicada em diversas pesquisas científicas como Bressiani et al. (2015), Carvalho Neto et al. (2011), Ferrigo (2014), Santos et al. (2014), Bonumá et al. (2010) que utilizaram o SWAT para analisar a eficiência do modelo em simular os processos hidrossedimentológicos em diferentes bacias hidrográficas.

No semiárido brasileiro, o modelo foi aplicado em estudos como Fontes Junior e Montenegro (2019), que investigaram os impactos do reflorestamento da Caatinga arbórea sobre a disponibilidade de água na bacia hidrográfica do Riacho Mimoso, no semiárido de Pernambuco, usando o modelo SWAT como ferramenta de gerenciamento. Para a bacia do rio Jaguaribe, no Ceará, Bressiani et al. (2015) aplicaram o modelo para avaliar os efeitos de diferentes resoluções espaciais e temporais de dados climáticos na modelagem de vazões. Santos (2015) realizou uma análise espaço-temporal dos processos hidrossedimentológicos, em diferentes condições de clima e uso do solo, na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. Na Paraíba, Medeiros e Silva (2014) analisaram a aplicabilidade do SWAT para analisar o comportamento das perdas de água e solo na Bacia Experimental de São João do Cariri.

Em aplicações da nova versão SWAT+, Bieger et al. (2017) introduz as modificações na estrutura e organização do modelo e aplica à Bacia Experimental de Little River, na Geórgia, simulando o comportamento hidrológico da bacia e comparando-o aos modelos anteriores, apresentando resultados satisfatórios de simulação. Arnold et al. (2018), discute a adequação do uso de tabelas de decisão desenvolvidas para irrigação e liberação da água de reservatório na simulação do SWAT+, no reservatório de Grapevine, Texas. Bieger et al. (2019) utilizaram uma nova atualização do SWAT+, a geração unidades de paisagem (*Landscape units – LSU*), para estudar diferentes cenários de conectividade entre terras altas, várzeas e córregos como distintas unidades de paisagem, avaliaram seus impactos na simulação do escoamento e discutiram os desafios associados à representação da conectividade hidrológica no modelo. Bailey et al. (2020), utilizaram o MODFLOW acoplado ao SWAT+ para simular o fluxo de água subterrânea. E outros autores como Wu et al. (2020) e Nkwasa et al. (2020) testaram a nova versão em outras aplicações de pesquisa.

Outros estudos utilizando a nova versão do modelo ainda estão em andamento para serem publicados pela comunidade científica. Todavia, as aplicações do SWAT nos últimos anos nas bacias hidrográficas brasileiras e por todo o mundo tem apresentado bons resultados e comprovam a aplicabilidade do modelo como uma ferramenta para auxiliar gestores ambientais em tomadas de decisão a partir de uma fundamentação científica.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Taperoá (Fig. 1) está localizada na região central do estado da Paraíba, entre as coordenadas 6°51'44" de latitude sul e 36°00'10" de longitude oeste (Figura 1). Essa bacia possui uma área aproximadamente 5.658 km<sup>2</sup> e suas altitudes variam entre 400 e 650 metros. A bacia do Rio Taperoá faz parte da região semiárida brasileira e está inserida no Cariri Paraibano, sendo o seu curso d'água mais importante o rio Taperoá, de regime intermitente, que nasce na Serra do Teixeira e desemboca no Rio Paraíba, no Açude Boqueirão (FRANCISCO, 2013).

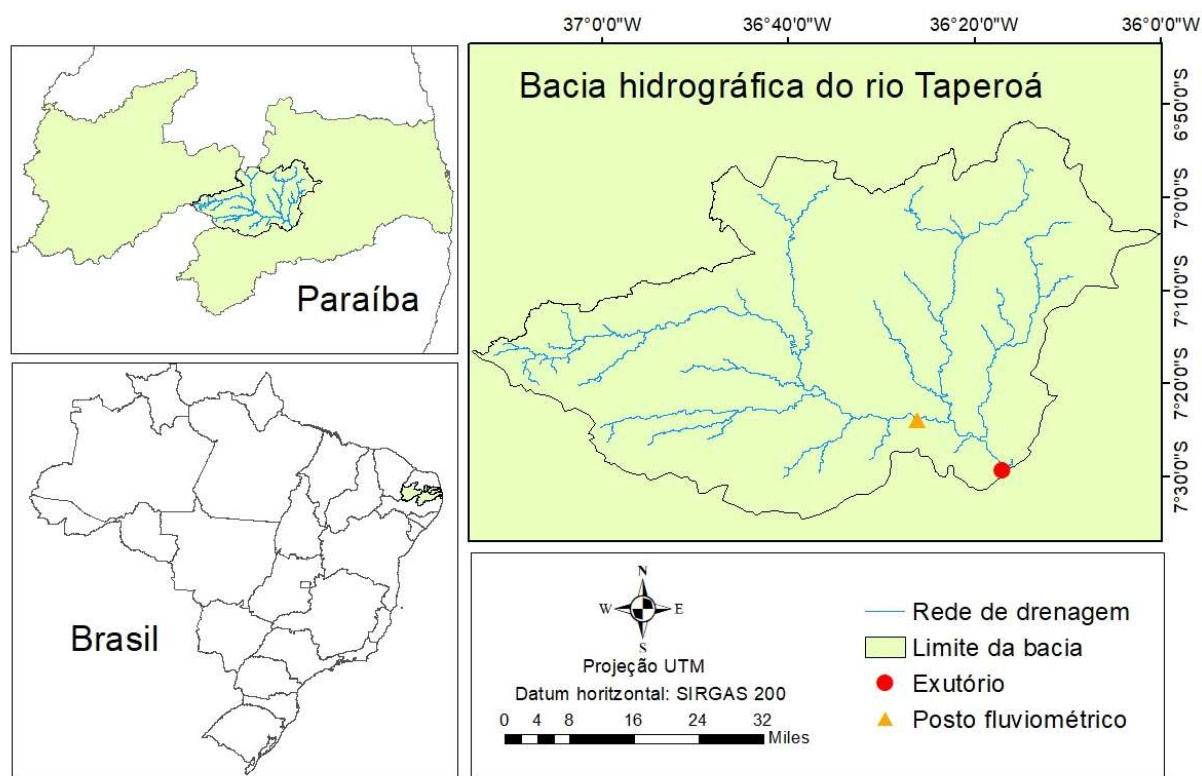


Figura 1 - Mapa de localização da bacia do rio Taperoá.

De acordo com a classificação climática descrita em Mendonça e Danni-Oliveira (2007), está localizada em uma região de clima tropical equatorial do tipo 2d, com a ocorrência de 9 a 11 meses secos e concentração de chuvas entre os meses de fevereiro a abril (Figura 2). É uma área que apresenta insuficiência e irregularidade na distribuição da precipitação, com baixos índices pluviométricos de 400 mm a 600 mm/ano e temperaturas médias superiores a 28°C. Na região a qual está inserida, a taxa de insolação média é de 2.800 horas/ano, com

umidade relativa do ar de aproximadamente de 50% e taxas médias de evaporação são em torno de 2.000 mm/ano (NASCIMENTO e ALVES, 2008).

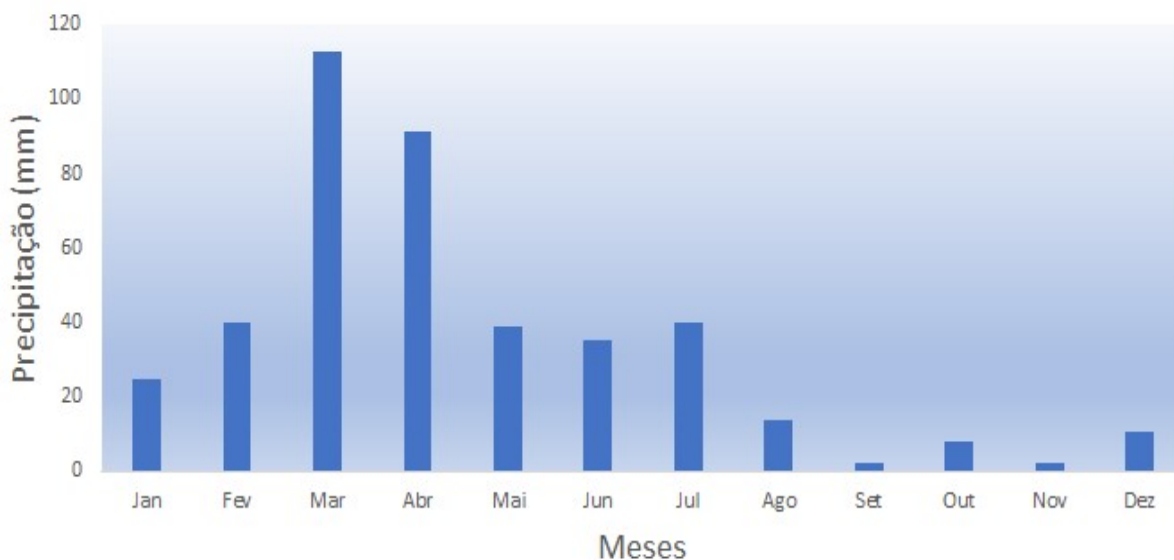


Figura 2 - Médias pluviométricas na bacia do rio Taperoá para o período de 1982 a 1990.  
Fonte: ANA (2020)

A vegetação predominante na bacia é do tipo caatinga, em sua maior parte de porte baixo, com espécies caducifólias de natureza xerófila, com características comuns de resistência à carência hídrica e com formação vegetal de grande adaptação a seca (SOUZA, 2008). As áreas utilizadas para agricultura são ocupadas pelas culturas de palma forrageira, agave, algodão, milho e feijão (SOUZA et al., 2004).

A região do cariris, na qual está inserida, apresenta clima seco semiárido, solos rasos, subsolo derivado do embasamento cristalino, vegetação arbustiva típica de caatinga e relevo ondulado (SANTOS et al., 2005). A pedologia é mais variada, englobando vários tipos de solo, em sua maioria pouco espessos, cascalhento ou pedregosos (SOUZA et al., 2004). Os tipos de solo predominantes nessa bacia neossolo litólico, luvisolo crômico, planossolo, neossolo regolítico, neossolo flúvico, vertissolo, cambissolo, latossolo e afloramentos rochosos.

A bacia do Rio Taperoá, encontra-se geograficamente localizada no centro de uma região, cercada por uma serra fragmentada. Os cursos de águas naturais que cortam a área em estudo e que beneficiam de alguma forma o solo e a produção agropecuária são os seguintes: Rio Paraíba, Riacho do Marinho Velho, Riacho da Perna, Riacho dos Canudos, Riacho da Ramada, Riacho da Relva e Riacho do Feijão.

Um dos maiores problemas das regiões semiáridas do mundo é a irregularidade das chuvas, conjuntamente com a ocorrência de elevadas temperaturas, ocasionando grandes taxas de deficiência hídrica. A variabilidade térmica contrasta com o regime de chuvas na região. O principal período da estação chuvosa do semiárido do Nordeste brasileiro ocorre de fevereiro a maio e, é influenciado pelos oceanos tropicais e por fatores de circulação atmosférica de escala global e regional. Para uma avaliação das disponibilidades de água em regiões semiáridas, onde o problema do déficit hídrico provoca grandes impactos sociais, é importante se efetuar a contabilidade de água computando-se, sistematicamente, todos os ganhos e perdas. São considerados ganhos, as contribuições devido à precipitação pluviométrica e, as perdas, às abstrações devido à evapotranspiração.

#### **4.2 Modelo SWAT+**

O SWAT é um modelo hidrossedimentológico desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* (ARS), principal agência científica de pesquisa vinculada ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, com a finalidade de prever o impacto das práticas de manejo do solo sobre a produção de água, sedimentos e produtos químicos agrícolas em bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2011).

Criado na década de 1990, é resultado de anos de estudo e aprimoramento de outros modelos hidrológicos como o *Simulator for Water Resources in Rural Basins* - SWRRB (WILLIAMS et al., 1985; ARNOLD et al. 1990), *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* – CREAMS (KNISEL, 1980), *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* - GLEAMS (LEONARD et al., 1987) e *Erosion-Productivity Impact Calculator* – EPIC (WILLIAMS et al., 1984), agregando em si fundamentos de cada um desses modelos para contribuir em uma boa gestão de atividades agrícolas (NEITSCH et al., 2011).

O SWAT ganhou aceitação em diversos países como uma ferramenta interdisciplinar para estudar bacias hidrográficas (DILE et al., 2016) e passou por uma série de revisões e atualizações com o propósito de melhorar suas capacidades. A sua maior atualização resultou no SWAT+, uma versão inteiramente revisada do modelo, mantendo os algoritmos básicos para calcular os processos hidrológicos, mas modificando consideravelmente a estrutura e organização do seu código e dos arquivos de entrada, se tornando mais flexível que o SWAT em termos de representação espacial dos processos hidrológicos e das interações no modelo e dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica (BIEGER, 2017).

Como principais características, é um modelo de base semi-física, que incorpora informações específicas da bacia hidrográfica sobre o clima, propriedades do solo, topografia e uso e ocupação do solo, ao invés de incorporar equações que descrevam essas relações, no qual os processos são diretamente modelados com base nos dados observados de entrada. Esse modelo é contínuo no tempo, capaz de simular os processos hidrológicos a longo prazo, em escala diária, mensal ou anual. O modelo SWAT é semi-distribuído, levando em consideração a variabilidade espacial dos muitos parâmetros do modelo (ARNOLD et al., 2012).

Como é um modelo de vasta aplicação, pode ser utilizado para simular diversos processos hidrológicos na bacia, como escoamento superficial, percolação, fluxo lateral superficial e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de redes de drenagem, ciclo hidrossedimentológico, nutrientes, pesticidas e bactérias (NEITSCH et al., 2005). As informações sobre os aspectos conceituais do modelo e as equações utilizadas para todos os cálculos dos processos podem ser consultadas no *Soil & Water Assessment Tool – Theoretical Documentation* (NEITSCH et al., 2011), manual que descreve detalhadamente todos os processos e equações envolvidas na modelagem do SWAT. As etapas dos processos a serem realizados na interface de SIG podem ser consultados no *QGIS Interface for SWAT+: QSWAT+* (DILE et al., 2019).

#### 4.2.1 Descrição do Modelo SWAT+

O modelo hidrológico é baseado no princípio de que a equação do balanço hídrico é a força motriz por trás de todos os processos hidrológicos simulados na bacia hidrográfica (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011). (Eq. 1)

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

onde  $SW_t$  é a quantidade final de água no solo (mm);  $SW_0$  a quantidade inicial de água contida no solo no dia  $i$  (mm);  $t$  o tempo (dias);  $R_{day}$  a precipitação no dia  $i$  (mm);  $Q_{surf}$  o escoamento superficial no dia  $i$  (mm);  $E_a$  é evapotranspiração no dia  $i$  (mm);  $W_{seep}$  representa a quantidade de água que entra na zona vadosa no dia  $i$  (mm);  $Q_{gw}$  a quantidade de fluxo de retorno no dia  $i$  (mm).

A variável estudada na pesquisa é o escoamento superficial, que é a parcela de precipitação que ao atingir o solo escoar pela superfície logo, quando a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração (PINTO et al., 1976) e pode ser calculado no

modelo a partir do método de infiltração de Green & Ampt (1911) e do método da Curva Número desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* – SCS (1972). Para estimar o escoamento a partir do método de Green & Ampt, o modelo requer que sejam fornecidos dados sub-diários de precipitação na bacia. Dessa forma, o método adotado para o estudo foi o da Curva Número, desenvolvido para estimar o escoamento para diferentes usos da terra e tipos de solo (RALLISON e MILLER, 1981). O escoamento superficial é obtido a partir da Eq. 2.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (2)$$

sendo S o parâmetro de retenção (mm). Segundo Neitsch et al. (2011), este parâmetro varia espacialmente e temporalmente na bacia, de acordo com sua alteração do solo, uso e ocupação da terra, declividade e as mudanças de umidade, definido pela Eq 3.

$$S = 25,4 \left( \frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

em que CN indica o número da curva para o dia, sendo um parâmetro com valores tabelados de 0 a 100, estando relacionado a permeabilidade e a capacidade de retenção máximas do solo, tal que CN próximo a 0 é um solo com capacidade de filtração infinita e o CN próximo a 100 é um solo completamente impermeável.

A evapotranspiração é a principal forma pelo qual a água é removida da bacia, incluindo todos os processos em que a água na superfície é convertida em vapor d'água, como a evaporação a partir do dossel das plantas, transpiração, sublimação da neve e evaporação do solo (FERRIGO, 2014). Foram incorporados ao SWAT+ três métodos para sua possível determinação: o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), método de Priestley\_Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) e o método de Hargreaves (HARGREAVES et al., 1985). O método utilizado no processamento do modelo foi o método de Penman-Moneith, para obter a evapotranspiração a partir dos parâmetros climatológicos de radiação solar, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento, requeridos e avaliados no processo (Eq. 4) (ALLEN et al., 1998).

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot (0,622 \cdot \lambda \cdot \frac{\rho_{air}}{P}) \cdot (e_z^n - e_z) / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{r_c}{e_a})} \quad (4)$$

em que  $\lambda E$  é a densidade de fluxo de calor latente ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ );  $E$  representa a taxa de evaporação de profundidade ( $\text{mm}/\text{d}$ );  $\Delta$  é a declividade da curva da pressão-temperatura do valor de saturação;  $H_{\text{net}}$  é a rede de radiação ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ );  $G$  é a densidade do fluxo de calor para o solo ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ );  $\rho_{\text{air}}$  é a densidade do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_p$  é o calor específico em pressão constante ( $\text{MJ}/\text{Kg } ^\circ\text{C}$ ); e  $\theta_z$  é a pressão do valor de saturação de ar na altura  $z$  ( $\text{kPa}$ );  $e_z$  é a pressão do vapor de água de ar na altura  $z$  ( $\text{kPa}$ );  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $r_c$  é a resistência do dossel de planta ( $\text{s}/\text{m}$ ); e  $r_a$  é a resistência de difusão da camada de ar ( $\text{s}/\text{m}$ ).

O SWAT+ permite que a bacia hidrográfica seja dividida em sub-bacias menores e, posteriormente, em unidades de paisagem. Ao subdividir as bacias mais complexas para calcular os processos de escoamento, produção de sedimentos e transporte de nutrientes, resulta em um aumento da precisão da simulação e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico (ARNOLD, 1998). Os processos hidrológicos são calculados a nível de HRU por meio dessas equações descritas, utilizando os dados observados de entrada.

#### 4.3 Etapas de execução do modelo

Para identificar como as resoluções espaciais de MDEs impactam na simulação do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica do semiárido, foram feitas 11 simulações no modelo, utilizando como dado as mesmas condições climatológicas, de tipo e uso do solo e as mesmas características para a discretização da bacia, modificando apenas o dado da topografia para cada uma. O processamento foi dividido em três etapas, conforme é apresentado o fluxograma a seguir (Fig. 3).

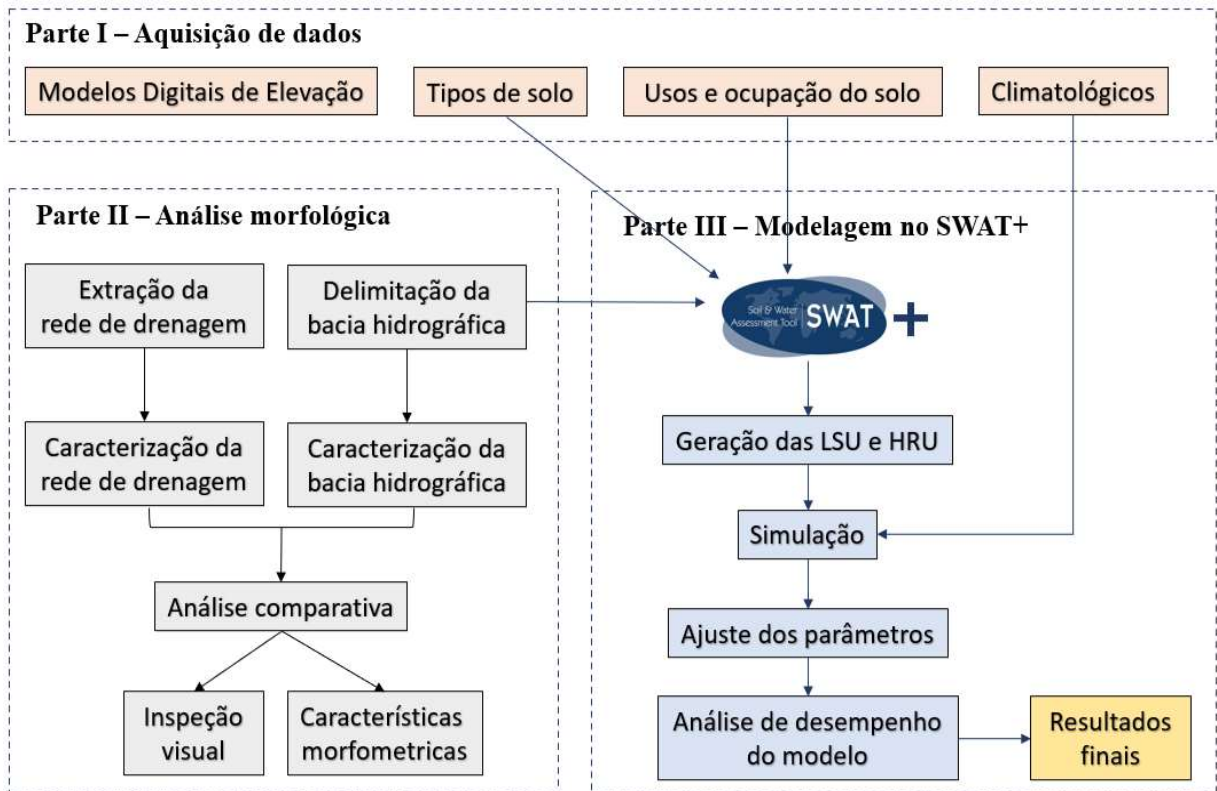


Figura 3: Fluxograma das etapas de execução do modelo.

A modelagem hidrológica é executada no QSWAT+, uma interface do modelo SWAT+ acoplada ao software QGIS, um SIG de acesso livre que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Por dessa interface, os dados são preparados e inseridos no formato padrão do modelo.

#### 4.3.1 Elaboração do banco de dados

O SWAT+ é um modelo hidrológico amplo que requer como dados de entrada uma vasta quantidade de informações acerca das características da bacia hidrográfica de estudo. A seguir são apresentadas as etapas de elaboração do banco de dados exigido pelo modelo. Segundo Fukunaga (2012), utilizar dados incoerentes ou de má qualidade em um modelo computacional, gera resultados igualmente ruins em suas simulações. Diante disso, para adquirir bons resultados na execução, é importante a inserção de dados coerentes, de maneira organizada e com formatações pré-definidas conforme exige o modelo.

#### 4.3.1.1 Modelos Digitais de Elevação

Os modelos digitais de elevação são utilizados para representar a superfície topográfica da área de estudo. A partir do seu processamento inicial no modelo, é possível obter informações básicas para o estudo hidrológico, como a declividade da região, a extração da rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica. Para testar a influência que os dados topográficos têm na simulação de escoamento superficial do modelo, três produtos globais de MDE foram considerados nesse estudo. Todos os produtos são disponíveis a domínio público, de acesso livre para os usuários nas plataformas digitais, pelo endereço eletrônico dos órgãos responsáveis, como indica a Tabela 2 apresentada a seguir.

Tabela 2 – MDEs utilizados nesta pesquisa.

| ID | MDE        | Resolução Espacial | Disponibilidade                                                                |
|----|------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | SRTM       | 30 m               | <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>  |
| 2  | AW3D30     | 30 m               | <a href="http://eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/">eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/</a> |
| 3  | ASTER GDEM | 30 m               | <a href="https://earthdata.nasa.gov/">https://earthdata.nasa.gov/</a>          |

Para a realização deste trabalho foram usados três produtos de diferentes fontes. Produtos oriundos da missão *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, com resoluções espaciais de 30 metros oriundos do projeto colaborativo entre a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA) e a Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NIMA), que fez uma varredura de 80% de todo o globo, exceto as áreas dos polos, em fevereiro de 2000. Produtos do satélite ALOS, que são obtidos em uma plataforma de observação terrestre desenvolvida pela Agência Japonesa de Exploração Aeroespacia (JAXA) e que disponibiliza um MDE gerado a partir de imagens coletadas usando o Instrumento de Sensoriamento Remoto Pancromático para Mapeamento Estéreo (PRISM). Por fim, também foram usados MDEs gerados a partir de imagens coletadas pelo sensor ASTER, a bordo do satélite Terra, desenvolvido pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI) e a NASA.

Para analisar a influência das resoluções espaciais na estimativa de vazão, utilizou-se a metodologia proposta por Tan et al. (2015) de utilizar apenas uma fonte de MDE para fazer as reamostragens na imagem e modificar a resolução espacial do *raster* para serem analisadas. Dessa forma, utilizou-se o produto SRTM de 30 m para a reamostragem do MDE pelo processo de interpolação por vizinho mais próximo. As reamostragens foram feitas para as resoluções de 70, 100, 200, 300, 500, 800, 1000 e 1500 m.

Diante disso, foram feitas 11 simulações no modelo para os diferentes MDEs. Foram realizadas três simulações utilizando o SRTM, ALOS e ASTER de 30 m para comparar a influência das diferentes fontes de obtenção na imagem. E foram processadas 9 simulações dos produtos SRTM para analisar a influência das resoluções espaciais.

#### 4.3.1.2 Tipos de solo e uso e ocupação do solo

O uso do solo é um importante parâmetro na modelagem hidrológica, visto que influencia diretamente na dinâmica do escoamento superficial da bacia (DANTAS, 2016). O mapa com a classificação do uso e cobertura da terra (Figura 4) foi elaborado por Henriques et al. (2017) que utilizou imagens de satélite Landsat 5/TM, para determinar as quatro classes de solo na bacia usando o método supervisionado a partir do classificador de Máxima Verossimilhança, no software ArcGis<sup>®</sup>. Para a região foram determinadas quatro classes de uso do solo: corpos hídricos, vegetação arbustiva, vegetação herbácea e vegetação arbórea. A classificação foi validada com base em visitas de campo na área de estudo.

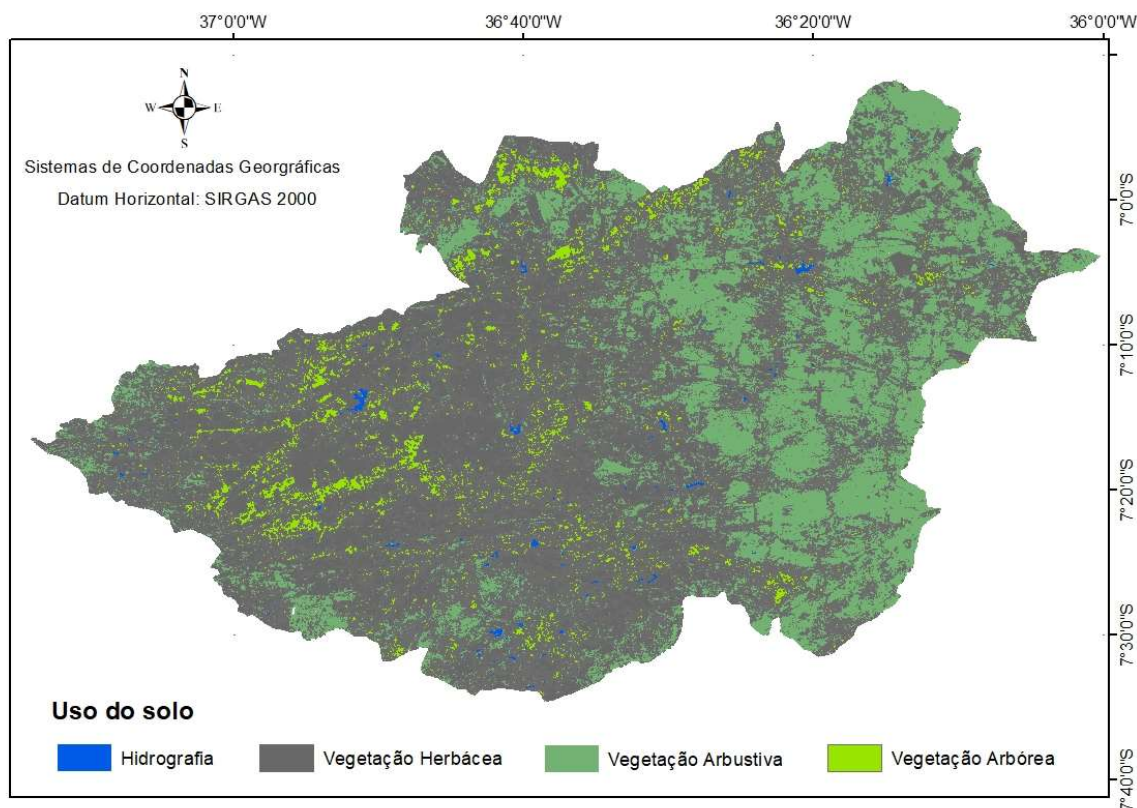


Figura 4 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia.

Para a inserção das informações de uso do solo no modelo, elas devem ser associadas as classes de uso do solo de um banco de dados americano próprio do SWAT+, de forma que apresente maior similaridade nas características entre ambas. Essa associação gera uma reclassificação de acordo com os parâmetros existentes no banco de dados do modelo. Diferente do SWAT, a nova versão do SWAT+ permite que esses parâmetros sejam ajustados no arquivo .csv, o qual é inserido nas definições das HRUs. A associação entre a classificação do uso do solo determinado pelo usuário e o uso do solo do banco de dados do SWAT+, assim como sua área na bacia, são escolhidos conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Associação entre o uso e ocupação do solo na bacia com as classes do banco de dados do SWAT+.

| Classe de uso do solo na bacia | Classe de uso do solo no SWAT+ | Área (km²) |
|--------------------------------|--------------------------------|------------|
| Corpos hídricos                | Water - WATR                   | 17,4       |
| Vegetação arbustiva            | Range-Brush - RNGB             | 1616,1     |
| Vegetação herbácea             | Range-Grass - RNGE             | 3032,9     |
| Vegetação arbórea              | Barren - BARR                  | 976,6      |

Na bacia do Rio Taperoá é possível identificar 8 tipos de solo em toda sua extensão. Na Tabela 4 e Figura 5 a seguir, é apresentado a distribuição espacial de cada tipo de solo na região, a área que ocupa e a sua descrição.

Tabela 4 – Caracterização dos tipos de solo da bacia.

| Tipo de solo        | Área (km²) | Área (%) | Descrição                                                                                                                                                                            |
|---------------------|------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Neossolo Litólico   | 1994.77    | 35.20%   | Solo constituído, em grande parte, por fragmentos de rocha maiores que 2 mm, apresentando contato direto entre o horizonte A e o C; normalmente não ultrapassa 50 cm de profundidade |
| Luvissolo           | 1458.26    | 25.73    | Solo formado por material mineral, compreendendo horizonte B textural com alta saturação de bases e argilas de alta atividade                                                        |
| Planossolo          | 918.79     | 16.21    | Solo apresentando horizonte A e E seguidos de horizonte B plânico (pouco permeável), constituído por material mineral                                                                |
| Neossolo Rigolítico | 790.59     | 13.95    | Solo com horizonte A sobrejacente ao horizonte C, podendo haver horizonte Bi com espessura menor que 10%                                                                             |
| Neossolo Flúvico    | 2899.08    | 5.10     | Solo originário de sedimento aluvial de caráter flúvico                                                                                                                              |
| Vertissolo          | 131.61     | 2.32     | Solo com horizonte vértico variando entre 25 e 100 cm de profundidade e com aspectos texturais insuficientes para                                                                    |
| Cambissolo          | 84.03      | 1.48     | Solo formado por material mineral com horizonte B incipiente abaixo da maioria dos horizontes superficiais                                                                           |
| Latossolo           | 0.33       | 0.01     | Solo que apresenta horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A                                                                                                       |

Fonte: Dantas (2016)

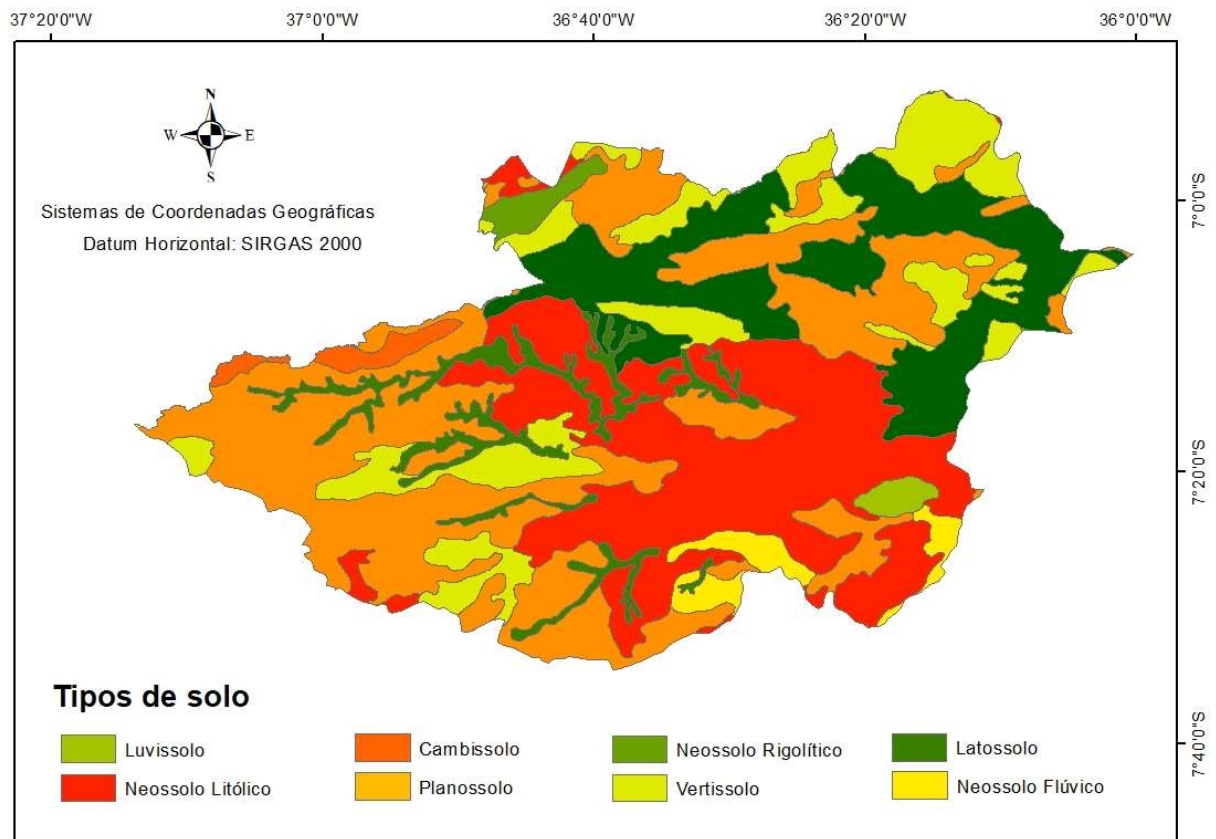


Figura 5- Distribuição espacial dos tipos de solo existentes na bacia do Rio Taperoá.

Para o processamento dos tipos de solo na modelagem, o SWAT+ requer que sejam inseridos em seu banco de dados informações das características hidrodinâmicas para cada de solo existente na bacia. Os parâmetros referentes as características observadas na região incluem o número de horizontes (NLAYERS), profundidade da raiz (SOL\_ZMX), porcentagem de silte (SILT), areia (SAND), argila (CLAY), cascalho (ROCK) e carbono orgânico (CBN) que foram obtidas a partir do endereço eletrônico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, pelo portal do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>).

Para os demais parâmetros exigidos, não existem dados observados na bacia que estejam disponíveis ao uso. Dessa forma, foram adotados valores recomendados pela literatura e adaptados para a área de estudo. Para definição dos grupos hidrológicos correspondente aos tipos de solos (HYDGRP) foram adotados os tipos A, B, C e D propostos pelo Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos Estados Unidos (NRCS, 2009), determinados a partir dos níveis do calor da condutividade hidráulica que cada solo possui.

A capacidade de água disponível no solo (SOL\_AWC) foi adotada a partir dos valores propostos por Salter e Williams (1997; 1969), que determinaram seus valores com base nas características do solo. A porosidade (ANION\_EXCL) e a condutividade hidráulica (SOL\_K) foram definidos de acordo com Rawls et al. (1982), que afirmam serem parâmetros necessários para quantificar a água disponível para a vegetação e para modelar o movimento da água através dos solos. Os fatores de erodibilidade (USLE\_K) utilizados foram propostos por Williams (1975), que calcula esse fator com base nas características de areia, silte, argila e matéria orgânica presente no solo da bacia. Os valores de albedo (SOL\_ALB) foram utilizados os propostos por Tsvetsinskaya (2002), que calcularam o albedo para diferentes tipos de solos de acordo com a classificação da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO, a partir de imagens adquiridas do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS.

#### 4.3.1.3 Dados meteorológicos e fluviométricos

Por fim, o modelo pede informações relacionadas as condições climáticas da área de estudo, como precipitação, radiação solar, velocidade dos ventos, temperaturas máximas e mínimas e umidade. Segundo Neitsch et al. (2011), esses dados são responsáveis por fornecer informações de umidade e energia que controlam o equilíbrio hídrico e guiam todos os outros processos hidrológicos simulados na bacia hidrográfica. Todavia, a área de estudo tem um déficit de dados meteorológicos diários observados.

Os dados das precipitações observadas na bacia foram obtidos a partir de séries históricas disponíveis em 12 postos pluviométricos, entre o período de 1970 e 1990, como apresentado na Tabela 5. Os dados são monitorados pela Agência Nacional de Águas – ANA e disponibilizados na plataforma digital do Hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>).

Tabela 5 – Postos pluviométricos inseridos na bacia do Taperoá.

| Posto Pluviométrico    | Código | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) |
|------------------------|--------|--------------|---------------|--------------|
| Taperoá                | 736002 | -7.20        | -36.83        | 500          |
| Santo André            | 736005 | -7.21        | -36.63        | 470          |
| Santa Tereza           | 736006 | -7.11        | -36.41        | 500          |
| Soledade               | 736008 | -7.06        | -36.36        | 560          |
| Serra Branca           | 736009 | -7.48        | -36.66        | 450          |
| São José dos Cordeiros | 736011 | -7.38        | -36.81        | 061          |
| Pocinhos               | 736014 | -7.06        | -36.06        | 624          |
| Juazeirinho            | 736015 | -7.06        | -36.58        | 570          |
| Gurjão                 | 736016 | -7.26        | -36.48        | 337          |
| Coxixola               | 736017 | -7.61        | -36.61        | 468          |

|                    |        |       |        |     |
|--------------------|--------|-------|--------|-----|
| Desterro           | 737018 | -7.28 | -36.10 | 590 |
| Fazenda Bananeiras | 736026 | -7.51 | -36.96 | 700 |

Fonte: ANA (2020).

Em todos os postos pluviométricos foram encontradas falhas na medição, decorrentes de problemas operacionais pelo observador ou pelo aparelho utilizado para os registros. As falhas no monitoramento podem dificultar a organização dos dados de acordo com a necessidade do modelo. Diante disso, o preenchimento das falhas existentes nos postos pluviométricos pode ser realizado, de forma a possibilitar a utilização de uma série pluviométrica diária contínua no modelo. As falhas das estações foram preenchidas por meio do método de ponderação regional, que permite preencher as falhas de um posto a partir de uma ponderação com base nos dados de três postos vizinhos, considerando que a precipitação nessa estação é proporcional as estações vizinhas. O método de ponderação regional é dado pela Equação 5 descrita a seguir.

$$P_x = \left( \frac{M_x}{M_a} P_a + \frac{M_x}{M_b} P_b + \frac{M_x}{M_c} P_c \right) \quad (5)$$

onde  $P_x$  é a precipitação na estação a ser preenchida, representando as falhas;  $M_x$  a média aritmética das precipitações do posto com falha;  $M_a$ ,  $M_b$  e  $M_c$  a média aritmética das precipitações dos postos vizinhos;  $P_a$ ,  $P_b$  e  $P_c$  as precipitações nos postos vizinhos na a data a ser preenchida.

Os dados meteorológicos são usados para simular os processos hidrológicos no SWAT (DILE e SRINIVASAN, 2014). Na bacia do rio Taperoá é difícil obter séries históricas de dados meteorológicos observados em termos de quantidade e de qualidade. Diante disso, optou-se por seguir as recomendações do *SWAT+ Documentation* (<https://swatplus.gitbook.io/docs>) e utilizar os dados de temperatura, umidade, radiação solar e velocidade dos ventos obtidos a partir do conjunto de dados de reanálise do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), do Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP) dos Estados Unidos, como parte de um sistema de previsão de clima e disponíveis no endereço eletrônico do *Global Weather Data for SWAT* (<https://globalweather.tamu.edu>). De acordo com Alemayehu et al. (2016), o CFSR tem uma resolução horizontal global de aproximadamente 38 km e abrange o período de 1979 a 2010 em um intervalo de tempo diário para todo globo em um formato que pode ser utilizado no simulador do SWAT+. Para as simulações, foram coletados dados climatológicos de reanálise para o período de 1979 a 1990.

Para verificar a vazão simulada pelo modelo na bacia do rio Taperoá, os resultados do modelo foram comparados aos dados de vazão observados de uma estação fluviométrica monitorada. O posto fluviométrico de Poço de Pedras (Tabela 6) é o único ao longo da extensão da bacia que apresenta dados contínuos de vazão observada, utilizando. Apesar do monitoramento ter iniciado no ano de 1970, optou-se pela utilização de 1979 a 1990 como período de estudo, visto que é o intervalo de tempo sem falhas na série histórica e de medição contínua de vazão na bacia.

Tabela 6 – Postos fluviométricos inseridos na bacia do Taperoá.

| Posto Fluviométrico | Código   | Latitude<br>(°) | Longitude<br>(°) | Altitude (m) |
|---------------------|----------|-----------------|------------------|--------------|
| Poço de Pedras      | 38850000 | -7.39           | -36.43           | 430          |

Fonte: ANA (2020).

#### 4.3.1.4 Parâmetros climáticos

Os dados climáticos requeridos pelo modelo têm três objetivos principais: a estimativa da evapotranspiração potencial, o preenchimento automático de falhas e a elaboração de cenários futuros (Carvalho Neto, 2011). Esses objetivos podem ter concretizados a partir do gerador climático WXGEN, desenvolvido originalmente para o modelo EPIC (SHARPLEY e WILLIAMS, 1990). No gerador climático são inseridos os parâmetros do clima exigidos pelo modelo (NEITSCH, 2011).

Para os parâmetros climáticos, optou-se por não calcular baseado nos dados de reanálise do CFSR e sim baseado em dados observados da estação climatológica da bacia experimental São João do Cariri, uma bacia escola instalada no município de São João do Cariri, inserida dentro da bacia do rio Taperoá. Optou-se em utilizar os dados da bacia escola para o cálculo dos parâmetros por estar realmente situada na bacia hidrográfica de estudo e representativa para as características climáticas da região. Apesar de existirem dados monitorados na estação climatológica da bacia escola, eles não foram utilizados como dados de entrada no modelo, pois a estação conta com dados disponíveis apenas de 2001 a 2006.

As versões mais atualizadas do modelo contam com o software *WGN Parameters Estimation Tool* disponível no endereço eletrônico do modelo (<https://swat.tamu.edu/>), de livre acesso, e que traz mais praticidade para o cálculo automático de todas as estatísticas, a partir da inserção das séries de dados em arquivos *.txt*.

As estatísticas requeridas e calculadas são a precipitação média máxima mensal (TMP\_MAX\_AVE), precipitação média mínima mensal (TMP\_MIN\_AVE), desvio padrão da temperatura máxima diária (TMP\_MAX\_SD), desvio padrão da temperatura mínima diária (TMP\_MIN\_SD), precipitação média mensal (PCP\_AVE), desvio padrão da precipitação média diária (PCP\_SD), coeficiente de assimetria para a precipitação diária a cada mês (PCP\_SKEW), probabilidade de dia úmido após dia seco (WET\_DRY), probabilidade de dia úmido seguido de dia úmido (WET\_WET), número médio de dias de precipitações no mês (PCP\_DAYS), radiação solar diária média para o mês (SLR\_AVE), velocidade média do vento no mês (WND\_AVE) e a temperatura média diária do ponto de orvalho no mês (DEW\_AVE). A Tabela 7 a seguir traz o resumo de todos os parâmetros climáticos para a bacia do rio Taperoá.

Tabela 7 – Parâmetros climatológicos para bacia do rio Taperoá.

| Parâmetro   | Jan   | Fev   | Mar   | Abr   | Mai   | Jun   | Jul   | Ago   | Set   | Out   | Nov   | Dez   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| tmp_max_ave | 32.98 | 31.42 | 32.05 | 32.26 | 30.78 | 28.80 | 28.68 | 30.16 | 31.13 | 33.05 | 33.87 | 34.17 |
| tmp_min_ave | 21.93 | 21.34 | 21.27 | 21.18 | 20.82 | 19.21 | 18.58 | 18.32 | 18.85 | 20.07 | 20.86 | 21.73 |
| tmp_max_sd  | 2.59  | 1.79  | 1.66  | 1.57  | 1.40  | 1.96  | 1.84  | 1.40  | 1.12  | 0.98  | 0.91  | 1.01  |
| tmp_min_sd  | 0.92  | 0.91  | 1.06  | 1.01  | 1.33  | 1.80  | 1.93  | 1.43  | 1.43  | 0.91  | 0.94  | 0.93  |
| pcp_ave     | 83.29 | 87.68 | 83.63 | 41.76 | 49.58 | 65.13 | 28.17 | 24.03 | 4.31  | 9.17  | 2.07  | 35.32 |
| pcp_sd      | 9.83  | 10.81 | 8.93  | 4.93  | 6.68  | 5.65  | 4.12  | 2.12  | 1.30  | 3.15  | 0.72  | 8.61  |
| pcp_skew    | 5.13  | 4.76  | 4.77  | 5.28  | 7.28  | 5.80  | 8.16  | 3.35  | 12.33 | 13.15 | 12.80 | 9.10  |
| wet_dry     | 0.10  | 0.17  | 0.21  | 0.21  | 0.23  | 0.35  | 0.21  | 0.14  | 0.05  | 0.03  | 0.02  | 0.06  |
| wet_wet     | 0.63  | 0.46  | 0.44  | 0.36  | 0.37  | 0.62  | 0.18  | 0.53  | 0.20  | 0.38  | 0.33  | 0.33  |
| pcp_days    | 6.67  | 6.83  | 8.33  | 7.50  | 8.17  | 14.50 | 6.33  | 7.17  | 1.67  | 1.33  | 1.00  | 2.50  |
| pcp_hhr     | 11.44 | 12.78 | 13.31 | 4.93  | 8.69  | 7.27  | 4.15  | 2.28  | 1.18  | 2.56  | 0.59  | 9.87  |
| slr_ave     | 47.51 | 43.30 | 45.87 | 43.15 | 39.81 | 35.56 | 37.22 | 41.82 | 44.69 | 53.67 | 51.64 | 44.48 |
| dew_ave     | 70.44 | 74.19 | 72.64 | 72.08 | 75.24 | 75.92 | 76.93 | 74.76 | 69.80 | 65.39 | 65.47 | 67.09 |
| wnd_ave     | 2.41  | 1.94  | 1.84  | 1.84  | 1.77  | 1.67  | 1.91  | 2.19  | 2.66  | 2.89  | 2.94  | 2.45  |

## 4.3.2 Análise morfométrica

### 4.3.2.1 Delimitação da bacia e extração da rede de drenagem

A determinação da rede de drenagem de uma bacia é influenciada pela qualidade dos MDEs utilizados. Uma forma de avaliar o traçado dos cursos de rio para diferentes produtos e o quanto essas mudanças influenciam na simulação hidrossedimentológica de uma bacia, é quantificando as características dos rios e das bacias hidrográficas extraídas e comparando-os entre si e com os dados simulados de vazão e sedimentos.

Essas comparações são feitas inicialmente por uma abordagem qualitativa de inspeção visual, observando a similaridade entre as redes de drenagem traçadas pelos MDEs. Subsequentemente, é feita uma análise comparando as características morfométricas extraídas

no processamento. Foram medidos os comprimentos dos trechos totais dos rios, o comprimento do rio principal e calculados a sinuosidade, por meio da razão entre os comprimentos totais dos trechos de rios com o valor do talvegue do rio. A densidade de drenagem foi obtida pela razão do comprimento total dos rios pela área da bacia, e foi determinada a ordem dos rios.

Para a caracterização da bacia hidrográfica, são observadas as diferenças na delimitação das áreas da bacia, do perímetro e a altitude mínima e máxima que o modelo digital de elevação consegue representar na bacia. Além disso, foram utilizados o coeficiente de compacidade, obtido pela relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia (Eq. 6) e o fator de forma, que corresponde à relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (Eq. 7). Por fim, foram analisados os efeitos dessas diferenças no resultado final da modelagem.

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

sendo P o perímetro (km), A a área da bacia (km<sup>2</sup>), e L o comprimento axial da bacia hidrográfica (km).

#### 4.3.3 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica é processada na interface do modelo SWAT+. Para manter configuração da discretização da bacia semelhante para todos os produtos de MDE e poder compará-los posteriormente, todas as etapas do processo foram padronizadas.

Iniciando pelo delineamento a bacia hidrográfica, a primeira etapa consiste em extrair a rede de drenagem. Definiu-se uma área mínima de acumulação do fluxo de 1500 ha, tal que, abaixo desse valor estabelecido, nenhum curso de rio é criado. Gerada a rede de drenagem, as bacias hidrográficas são delimitadas a partir de um mesmo ponto de exutório. Por fim, foram definidas as LSU, por meio de um buffer desenhado ao redor da rede de drenagem, mas sem nenhuma análise de terreno envolvida.

A segunda etapa consiste em definir as unidades de respostas hidrológicas, que são as divisões das bacias em unidades menores, cada uma com uma combinação particular de solo/uso da terra/faixa de declive. São inseridos no formato *raster*, o uso e ocupação do solo e os

tipos de solo. Posteriormente, o modelo requer que sejam introduzidos os dados tabulares das características hidrodinâmicas do solo e a classificação do uso do solo de acordo com o banco de dados do SWAT+. Em seguida, foi determinado que o intervalo das classes de declividade na área são de 0 a 4%, 4 a 6%, 6 a 8%, 8 a 10%, 10 a 12% e superior a 12%, como proposto por Carvalho Neto (2011). Essa padronização permite que as HRUs no SWAT+ sejam processadas com os mesmos dados de entrada. Para a determinação final das unidades de respostas hidrológicas, determinou-se que o modelo considerasse em cada HRU o uso do solo, tipo de solo e declividade dominante.

Geradas as HRUs, a etapa final do processo consiste em inserir os dados climáticos e processar a simulação. Acoplado ao SWAT+ está o *SWAT Editor*, uma nova interface responsável por receber todos os dados climatológicos, processar o gerador climático e simular os processos hidrológicos. Ao importar o projeto para essa interface, são inseridos os dados do clima no gerador climático e selecionado um período de 1979 a 1990 para a simulação, considerando um período de aquecimento de 3 anos. Os parâmetros do modelo são ajustados manualmente de acordo com o proposto por Carvalho Neto (2011), descrito no item a seguir.

#### 4.3.5 Análises de desempenho do modelo

Para avaliar o desempenho do modelo na simulação dos processos hidrológicos, foram utilizadas comparações gráficas e análises estatísticas. A análise gráfica se dá por meio da comparação dos hidrogramas das vazões simuladas no SWAT+ com os dados de vazão observados nas medições do posto fluviométrico de Poço de Pedras. Para as análises estatísticas foram utilizados dois índices estatísticos. Optou-se pela aplicação do índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS), considerados por Sevat (1991) como a melhor função objetivo para o ajuste mais adequado do hidrograma. E optou-se, também, pela utilização do o coeficiente de determinação de Pearson ( $R^2$ ), calculando a relação linear entre a vazão observada e a simulada (Eqs. 8 e 9).

$$NS = 1 - \left[ \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum (Q_{obs} - \bar{obs}) \cdot (Q_{obs} - \bar{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{obs})^2 \cdot \sum (Q_{sim} - \bar{sim})^2} \right] \quad (9)$$

no qual,  $Q_{obs}$  é a vazão observada no posto pluviométrico;  $Q_{sim}$  é a vazão simulada no modelo;  $\overline{Q_{sim}}$  é a média da vazão simulada; e  $\overline{Q_{obs}}$  é a média da vazão observada da bacia.

O valor do Nash pode variar de  $-\infty$  a 1 e o  $R^2$  de 0 a 1, sendo  $NS = 1$  e  $R^2 = 2$  o ajuste perfeito dos resultados. Na Tabela 8 a seguir, é apresentada a classificação da eficiência da modelagem segundo Moriasi et al. (2007). Quando a simulação for classificada como insatisfatória é preciso fazer um ajuste no modelo.

Tabela 8: Classificação da eficiência da modelagem.

| Classificação  | $R^2$               | NS                 |
|----------------|---------------------|--------------------|
| Muito boa      | $0,80 < R^2 < 1,0$  | $0,75 < NS < 1,0$  |
| Boa            | $0,70 < R^2 < 0,80$ | $0,65 < NS < 0,75$ |
| Satisfatória   | $0,60 < R^2 < 0,70$ | $0,50 < NS < 0,65$ |
| Insatisfatória | $R^2 \leq 0,60$     | $NS \leq 0,50$     |

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007)

#### 4.3.4 Ajuste dos parâmetros

Neste estudo, a calibração automática do modelo SWAT+ não foi conduzida para nenhum cenário de MDE. A realização da calibração automatizada por meio de softwares como o SWAT-CUP e o IPEAT+ podem interferir na análise final dos resultados, pois a calibração dos parâmetros do modelo pode impactar as incertezas de dados de entrada (ZHANG et al., 2014; Tan et al., 2015). Todavia, buscou-se estabelecer algumas modificações para garantir maior semelhança entre a área de estudo e o que é considerado no processamento do modelo. Os valores de entrada de alguns parâmetros foram ajustados para um valor fixo, utilizadas de forma igual para todas as simulações.

Para o ajuste dos valores dos parâmetros, foi adotado o proposto por Carvalho Neto (2011) que estabeleceu algumas modificações que influenciam na simulação do comportamento da bacia, principalmente nos que regem a recarga do aquífero subterrâneo. De acordo com o proposto, visto que a região de estudo não possui aquífero subterrâneo, os parâmetros voltados a esse processo precisam ser ajustados de forma a respeitar a situação. Na Tabela 9 a seguir, é apresentada a relação dos parâmetros ajustados e seus valores modificados.

Tabela 9 - Parâmetros modificados do modelo.

| Parâmetro | Descrição                                           | Arquivo | Valor  |
|-----------|-----------------------------------------------------|---------|--------|
| ALPHA_BF  | Fator alfa do fluxo de base                         | .gw     | 0      |
| GW_REVAP  | Coefficiente “revap”                                | .gw     | 0.2    |
| REVAPMN   | Valor limite para prover “revap”                    | .gw     | 0 mm   |
| RCHRG_DP  | Fração que percola e abastecerá o aquífero profundo | .gw     | 0      |
| CH_N      | Número de Manning no canal principal                | .sub    | 0.03   |
| CH_EROD   | Fator de erodibilidade do canal                     | .rte    | 0.0157 |
| SURLAG    | Coefficiente de atraso do escoamento superficial    | .bsn    | 12     |
| CANMX     | Altura máxima de interceptação                      | .hru    | 0.5 mm |

Fonte: Carvalho Neto (2011)

Pelo apresentado por Carvalho Neto (2011), o ajuste desses parâmetros leva o modelo a ter uma maior verossimilhança com a área de estudo. Principalmente a modificação do parâmetro ALPHA\_BF para 0, que leva o modelo a anular a recarga de base, visto que ele se relaciona diretamente com o número de dias para o fluxo subterrâneo atingir o canal, e o menor valor do GW\_REVAP, que leva a promover uma ascensão de água conforme a evapotranspiração potencial. Ao zerar o valor do REVAPMN, toda a água que percola está passível do processo “revap” que, no SWAT+, é a simulação de um processo pelo qual a água é captada pelas raízes das plantas ou ascendem novamente a zona insaturada, levando a uma nova retirada de demanda evaporativa.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Impacto na topografia e nas características da bacia hidrográfica

As características da rede de drenagem traçadas na bacia para cada cenário de MDE são listados na Tabela 10 e podem ser observados na Figura 6. Os resultados mostram que as diferentes resoluções espaciais influenciam na representação topográfica e na extração da rede de drenagem nas bacias hidrográficas. Pode-se observar que quanto mais alta a resolução espacial do MDE, mais detalhados são seus delineamentos. Ao diminuir a resolução espacial pela reamostragem da imagem, o modelo tende a criar um sistema de drenagem mais suave e menos definido, com suas curvaturas reduzidas e traços mais retilíneos.

A diferença mais significativa entre os traçados foram os comprimentos dos rios. Para a imagem com resolução de 30 m, o comprimento do rio principal e o comprimento total dos rios são maiores, apresentando uma drenagem mais densa e com rios mais sinuosos. À medida em que se diminui a resolução da imagem, os rios vão ficando mais retilíneos, perdendo os contornos e tornando-se menos sinuosos.

Tabela 10 – Características dos rios para cada resolução do MDE SRTM.

| Resolução do MDE (m) | Rio principal (km) | Comprimento total dos rios (km) | Densidade de drenagem | Sinuosidade |
|----------------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------|
| 30                   | 153,03             | 1270,36                         | 0,224                 | 1,523       |
| 70                   | 146,87             | 1226,36                         | 0,218                 | 1,462       |
| 100                  | 147,81             | 1212,55                         | 0,215                 | 1,475       |
| 200                  | 144,16             | 1167,71                         | 0,206                 | 1,437       |
| 300                  | 141,17             | 1129,31                         | 0,202                 | 1,419       |
| 500                  | 140,02             | 1069,08                         | 0,192                 | 1,377       |
| 800                  | 139,99             | 1049,99                         | 0,190                 | 1,319       |
| 1000                 | 129,37             | 975,13                          | 0,182                 | 1,275       |
| 1500                 | 125,65             | 949,49                          | 0,174                 | 1,253       |

Entre o traçado gerado pelo produto de resolução mais alta de 30 m e a de resolução mais baixa de 1500 m, observa-se uma diferença de aproximadamente 27 quilômetros no comprimento do rio principal. Essa variação no comprimento pode causar uma diferença significativa na estimativa da vazão na bacia hidrográfica, considerando que o SWAT+ tem como um de seus diferenciais o aprimoramento do transporte de água, nutrientes e sedimentos por meio de um processo interligado pixel a pixel.

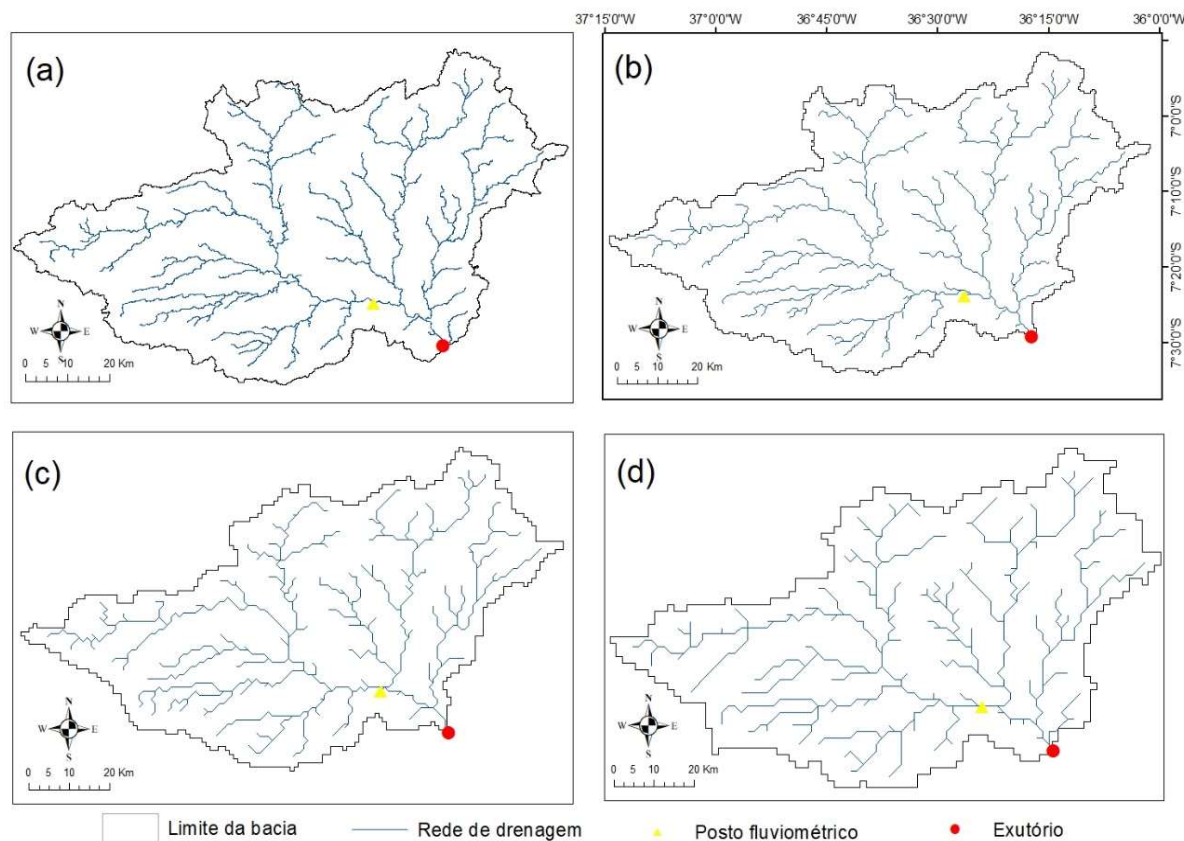


Figura 6: Delimitações da bacia derivadas de quatro resoluções de MDE: a) SRTM 30 m; b) SRTM 500 m; c) SRTM 1000 m; d) SRTM 1500 m.

Na Tabela 11 são apresentadas as características da bacia a partir das reamostragens do MDE SRTM. Reddy e Reddy (2015), Zhang et al. (2014) e Xu et al. (2016), que testaram a influência da resolução do MDE para o modelo SWAT, mostram que o MDE causa grande impacto no delineamento de uma bacia hidrográfica, influenciando no seu tamanho, nos resultados da rede de fluxo, no número de sub-bacias e na quantidade de HRUs. Para os MDEs utilizados em seus estudos, a menor resolução levou a perda de muita informação da topografia do terreno, onde observaram que a resolução mais fina rende um número de sub-bacias e HRUs muito superior aos de resolução mais baixa.

Para a bacia do rio Taperoá, pode-se observar que a mudança da resolução não afetou de forma significativa a altitude mínima da bacia, que foi preservada para todas os cenários do MDE. A altitude máxima apresentou uma certa subestimação de seus pontos mais altos, que chegou a ser uma diferença de 131 metros para a resolução mais baixa de 1500 m. A amplitude de elevação diminui proporcionalmente com a diminuição da resolução espacial do MDE, devido a perda de informações da topografia do terreno. O mesmo pode ser visto por Zhang et al. (2014) e Tan et al. (2015), que mostram essa variação da elevação é reduzida com a resolução

decrecente. Essa variação é um dos fatores que influenciam na discretização da bacia em números de sub-bacias e HRUs. Os cenários que utilizaram as resoluções mais alta do MDE apresentam uma maior área da bacia, chegando a uma diferença de 191 km<sup>2</sup> entre o de 30 m e o de 1500 m. Além disso, apresentam maior perímetro na delimitação da bacia, tem maior quantidade de HRUs e maior compacidade, devido a qualidade no seu traçado e por conseguir representar melhor a sinuosidade e as curvaturas da bacia e sua rede de drenagem. Todavia não gera o maior número de sub-bacias no modelo, pois a partir de 200 m de resolução, uma grande sub-bacia se divide em 3, gerando maior quantidade.

Devido a resolução mais alta apresentar informações mais precisas da topografia e da drenagem na região, faz com que as características da bacia sejam mais detalhadas, melhorando a discretização o que, como mostrou os resultados de Redy e Redy (2015), onde a maior discretização da bacia no modelo tende a tornar mais preciso a resposta do modelo ao simular os processos hidrológicos.

Tabela 11 – Características da bacia hidrográfica para cada resolução do MDE SRTM.

| <b>Resolução do MDE (m)</b> | <b>Área (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Perímetro (km)</b> | <b>Sub-bacias</b> | <b>HRU</b> | <b>Fator de forma (m/m)</b> | <b>Compacidade (m/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Altitude Mínima</b> | <b>Altitude Máxima</b> |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 30                          | 5663.11                      | 734.42                | 15                | 189        | 0.24                        | 2.73                                 | 386                    | 999                    |
| 70                          | 5638.23                      | 669.9                 | 15                | 187        | 0.26                        | 2.50                                 | 386                    | 995                    |
| 100                         | 5637.70                      | 647.8                 | 15                | 189        | 0.26                        | 2.42                                 | 386                    | 993                    |
| 200                         | 5661.48                      | 611.6                 | 17                | 191        | 0.27                        | 2.28                                 | 386                    | 987                    |
| 300                         | 5603.13                      | 599.4                 | 17                | 189        | 0.28                        | 2.24                                 | 386                    | 991                    |
| 500                         | 5570.50                      | 567.00                | 17                | 183        | 0.28                        | 2.13                                 | 386                    | 976                    |
| 800                         | 5536.64                      | 538.10                | 17                | 177        | 0.28                        | 2.02                                 | 386                    | 917                    |
| 1000                        | 5360.00                      | 484.00                | 17                | 169        | 0.32                        | 1.85                                 | 386                    | 907                    |
| 1500                        | 5472.00                      | 480.20                | 17                | 167        | 0.35                        | 1.82                                 | 395                    | 868                    |

Na Tabela 12 a seguir são apresentadas as características da bacia quando processadas a partir de MDEs de diferentes fontes de obtenção. Pode-se observar que não há uma diferença significativa entre a discretização da bacia feita por cada uma. O produto ASTER é o que traça a rede de drenagem mais densa, com mais contornos, apresentando maior sinuosidade, maior comprimento total dos rios e maior comprimento do rio principal. O ALOS é o produto que apresenta uma rede de drenagem menos densa, com menor comprimento total dos rios e menor comprimento do rio principal. O SRTM é o produto que apresenta valores intermediário entre ambos para as características da bacia. Diante disso, pode-se observar que as características da rede de drenagem apresentam maior diferença no traçado de seus cursos quando feito para

diferentes resoluções de MDE, quando é possível observar que à medida que vai diminuindo a resolução, vão se perdendo informações da topografia do terreno e o traçado dos rios vai ficando mais retilíneos, menos densos e sinuosos. Quando comparado as fontes de obtenção, apresentam comportamento semelhantes, não determinando qual tem melhor detalhamento da drenagem da área. O traçado da drenagem e da bacia podem ser vistos na Figura 7 a seguir.

Tabela 12 – Características da rede de drenagem para cada fonte de MDE.

| MDE   | Rio principal (km) | Comprimento total dos rios (km) | Densidade de drenagem | Sinuosidade |
|-------|--------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------|
| SRTM  | 153,03             | 1270,36                         | 0,224                 | 1,523       |
| ALOS  | 151,88             | 1257,56                         | 0,223                 | 1,513       |
| ASTER | 156,30             | 1271,43                         | 0,225                 | 1,558       |

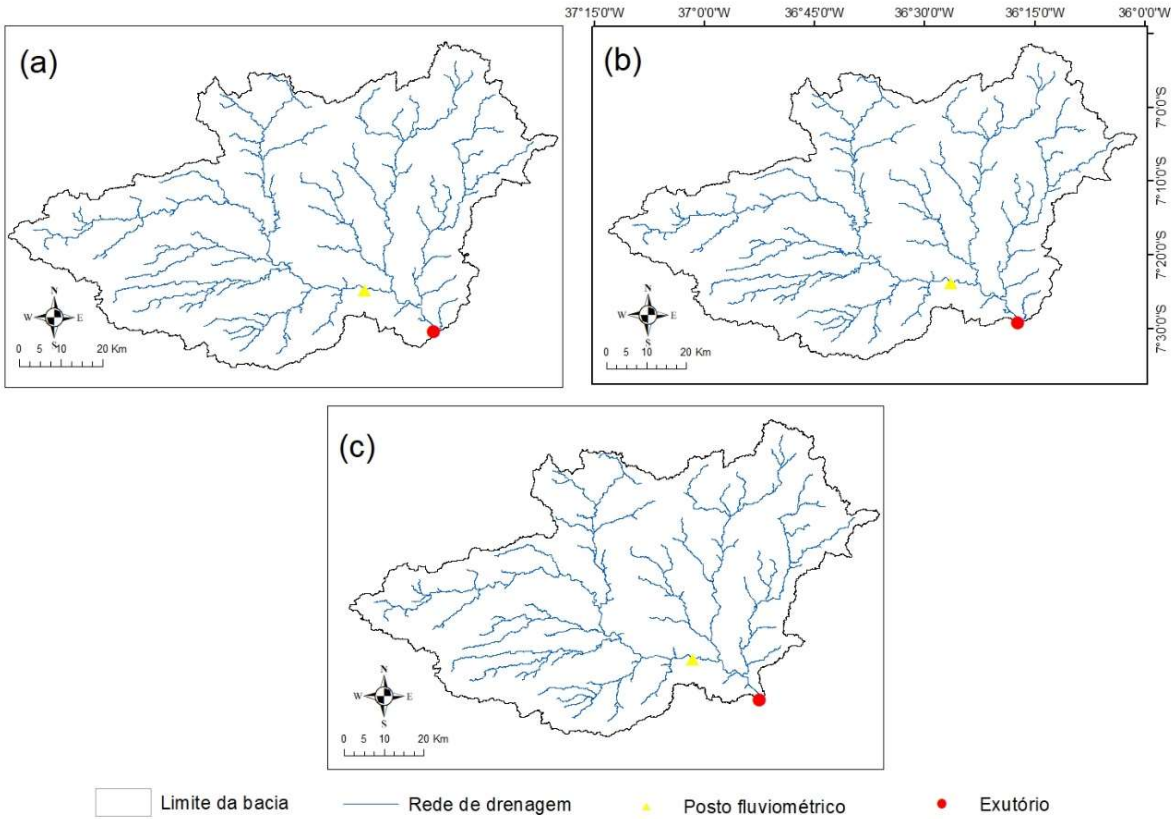


Figura 7 – Delimitações da bacia derivadas de três fontes de MDE: a) SRTM 30 m; b) ALOS 30 m; c) ASTER 30 m.

Quanto às fontes de obtenção (Tabela 13), observamos que, para todos os produtos, o modelo discretiza em um mesmo número de sub-bacias e quantidades próximas de HRUs, não havendo distinções que diferenciem tanto as representações da topografia por esses produtos.

Tabela 13 – Características da bacia hidrográfica para cada fonte de MDE.

| MDE   | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | Perímetro<br>(km) | Sub-<br>bacias | HRU | Fator de<br>forma<br>(m/m) | Compacidade<br>(m/m <sup>2</sup> ) | Altitude<br>Mínima | Altitude<br>Máxima |
|-------|----------------------------|-------------------|----------------|-----|----------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| SRTM  | 5663,11                    | 734,42            | 15             | 189 | 0.24                       | 2,73                               | 386                | 999                |
| ALOS  | 5633,98                    | 693,10            | 15             | 191 | 0.24                       | 2,59                               | 386                | 995                |
| ASTER | 5571,97                    | 758,16            | 15             | 193 | 0.23                       | 2,84                               | 386                | 993                |

## 5.2 Modelagem hidrológica

### 5.2.1 Estimativa de vazão

Inicialmente, o SWAT+ foi utilizado para simular a vazão da bacia para o período de 1982 a 1990, sem nenhuma alteração dos parâmetros do modelo. As simulações foram testadas em intervalos diários e mensais. As simulações diárias apresentaram resultados gráficos e estatísticos insatisfatórios, não conseguindo representar adequadamente os eventos que geraram escoamento na bacia. Dessa forma, optou-se por utilizar a modelagem em escala mensal que tem melhor resposta a sua representação hidrológica.

Ao analisar o comportamento do hidrograma gerado entre a vazão observada e a vazão simulada, o modelo tende a superestimar a vazão nos picos para toda a série histórica. Para melhorar a representação do modelo de acordo com os processos da bacia, alguns parâmetros podem ser ajustados. Como uma forma de aproximar essas características reais da bacia hidrográfica com o que é considerado no processamento do modelo, de forma a gerar uma melhor resposta do SWAT+ às estimativas dos processos hidrológicos, alguns parâmetros foram fixados para todas as simulações, em valores de acordo com o proposto por Carvalho Neto (2011). Ajustaram-se os valores dos parâmetros que regem a recarga do aquífero subterrâneo na bacia, o número de Manning, o fator de erodibilidade dos canais, o coeficiente de atraso do escoamento superficial e os parâmetros relacionados à altura de interceptação da vegetação.

Na Tabela 14 a seguir, são apresentados os valores dos coeficientes estatísticos do NS e do R<sup>2</sup> para as vazões simuladas pelo SWAT+ após o ajuste dos parâmetros do modelo, aplicada a diferentes resoluções espaciais. De acordo com a classificação de eficiência de Moriasi et al. (2007), as simulações apresentaram valores de R<sup>2</sup> considerados boas para as resoluções mais baixas, variando de 0,75 a 0,79, e muito boas para as resoluções mais altas, variando de 0,80 a 0,89.

Tabela 14 - Coeficientes estatísticos das simulações de vazão com diferentes resoluções de MDE.

| Resolução do MDE (m) | R <sup>2</sup> | Nash |
|----------------------|----------------|------|
| 30                   | 0,89           | 0,31 |
| 70                   | 0,84           | 0,40 |
| 100                  | 0,83           | 0,41 |
| 200                  | 0,79           | 0,45 |
| 300                  | 0,80           | 0,45 |
| 500                  | 0,76           | 0,45 |
| 800                  | 0,81           | 0,50 |
| 1000                 | 0,72           | 0,51 |
| 1500                 | 0,75           | 0,55 |

Diferente do R<sup>2</sup>, os valores obtidos do NS apresentaram resultados insatisfatórios para as resoluções mais altas, de 0,31 a 0,45, e satisfatórios para as resoluções mais baixas, de 0,5 a 0,55. Para entender a diferença do comportamento de ambos os índices para essas resoluções espaciais, pode-se analisar os hidrogramas para cada simulação. Como apresentado na Figura 8 a seguir, pode-se observar que o modelo tem uma resposta para cada evento de chuva que gerou escoamento, todavia, com as resoluções mais altas, o modelo tende a apresentar as vazões de picos superestimadas e com valores mais distantes do real observado na bacia. A medida em que se diminui a resolução espacial do MDE, o modelo tende a diminuir as vazões de pico, o que acaba aproximando-a mais vazão observada.

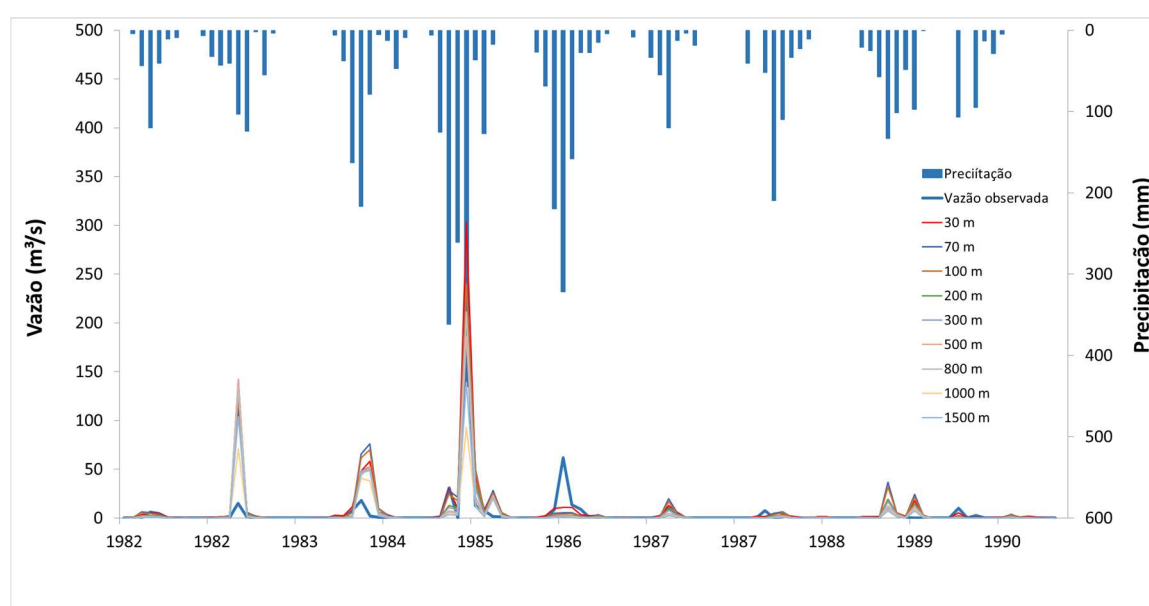


Figura 8 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas na bacia sob diferentes resoluções espaciais de MDE.

Essa diferença pode ser melhor observada na Figura 9 a seguir, em que se apresenta a comparação da vazão observada com a vazão simulada de resolução mais alta (30 m) e de resolução mais baixa (1500 m). A simulação com o cenário de MDE de resolução mais alta acompanhou bem o comportamento da bacia e teve resposta para todos os eventos de chuva que geraram escoamento, dando um bom resultado dos valores de  $R^2$ , todavia, as vazões de pico foram superestimadas, distanciando-se muito dos valores observados nesses pontos, o que resultou no NS mais baixo. Já a simulação de resolução mais baixa, o modelo não teve resposta para todos os eventos que geraram escoamento, principalmente a partir do ano de 1986. Todavia, as vazões de pico simuladas foram mais baixas e ajustadas a vazão observada, o que gerou um melhor valor de NS.

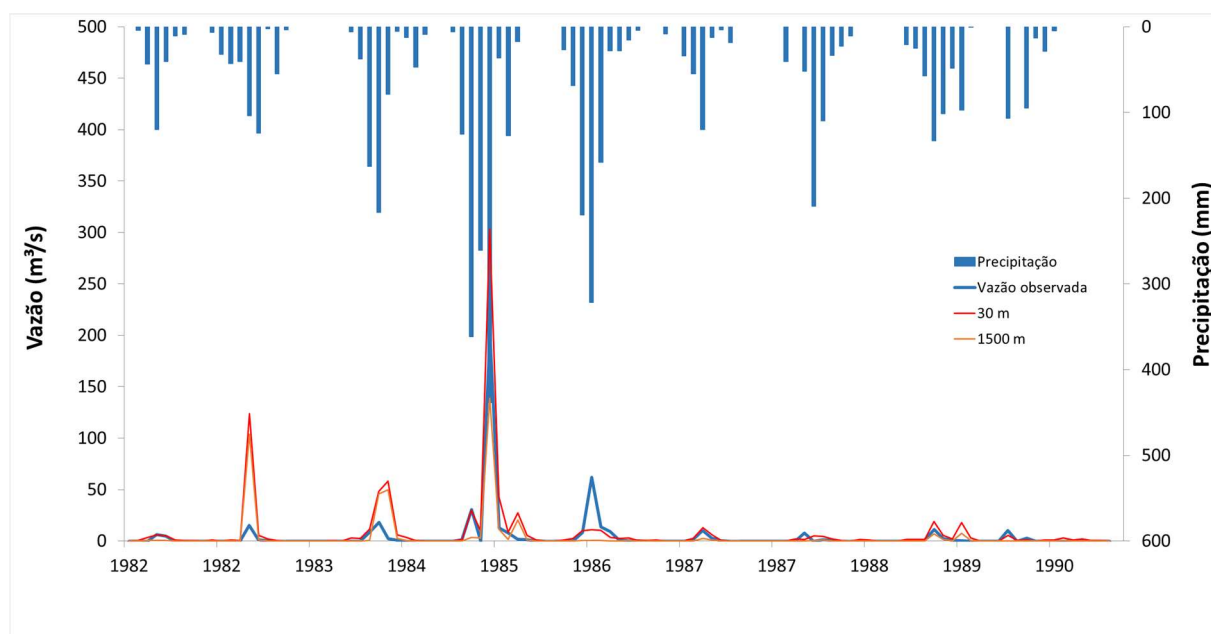


Figura 9 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas na bacia quando simuladas para as resoluções de 30 m e 1500 m.

A simulação da série histórica como um todo mostra que a bacia hidrográfica do rio Taperoá, assim como as bacias da região semiárida do Brasil, registra em sua maior parte da série histórica vazões no posto fluviométrico valores próximos a 0 m³/s. Segundo Dantas (2016), esse quadro é reflexo da irregularidade da distribuição anual das chuvas nas bacias da região semiárida do Nordeste, que concentra 64%, maior parte da precipitação, entre os meses de fevereiro e abril.

O SWAT+ também apresentou uma tendência a superestimar as vazões de pico nos primeiros anos da simulação, todavia, nos anos seguintes, houve uma subestimação desses

valores, não sendo capaz de estimar com aproximação as vazões de pico. Alguns fatores que podem contribuir para essa diferença de comportamento entre os primeiros e últimos anos. O primeiro caso pode ser pela diminuição dos totais pluviométricos para esse período, onde os dados meteorológicos levaram o modelo a subestimar a resposta do escoamento para esses anos.

Pode-se observar, também, que há uma baixa nos valores das vazões. Além das questões meteorológicas, alguns fatores podem estar relacionados é o erro na coleta de dados de vazão ou a construção de reservatórios no segundo período. Um ponto a ser considerado é que os reservatórios da área de estudo não foram considerados na modelagem, mas é um ponto que deve ser analisado, pois a construção de reservatórios na bacia pode interceptar parte da vazão ao longo da rede de drenagem, de forma que o volume escoado não seja registrado no posto fluviométrico, registrando valores de vazão inferiores aos valores registrados em períodos anteriores (DANTAS, 2016). Todavia, é importante que sejam utilizadas também algumas metodologias específicas que possam explicar este comportamento da vazão com maior grau de segurança.

Diante do exposto, podemos observar que as resoluções espaciais de MDE influenciam na simulação hidrológica do modelo, principalmente para a representação das vazões de pico. Mas, ainda assim, não afeta a modelagem de uma forma que o comportamento da vazão estimada seja muito distinto entre a de resolução mais alta para a de resolução mais baixa. Esse é um ponto importante a ser considerado na hora de escolher que imagem processar na modelagem. Se não há uma diferença tão significativa, permite que na modelagem de grandes bacias do semiárido de utilizem imagens de resoluções mais baixas obtendo, ainda assim, bons resultados. Isso facilita o processamento do modelo, deixando-o mais rápido e exigindo menos capacidade do computador para as simulações.

Quanto a influência dos produtos de MDEs de diferentes fontes de obtenção na modelagem hidrológica, a Figura 10 e Tabela 15 a seguir apresentam o comportamento da vazão simulada para os produtos SRTM, ALOS e ASTER. Pode-se observar que entre os produtos não há diferença significativa no comportamento da estimativa de vazão entre elas.

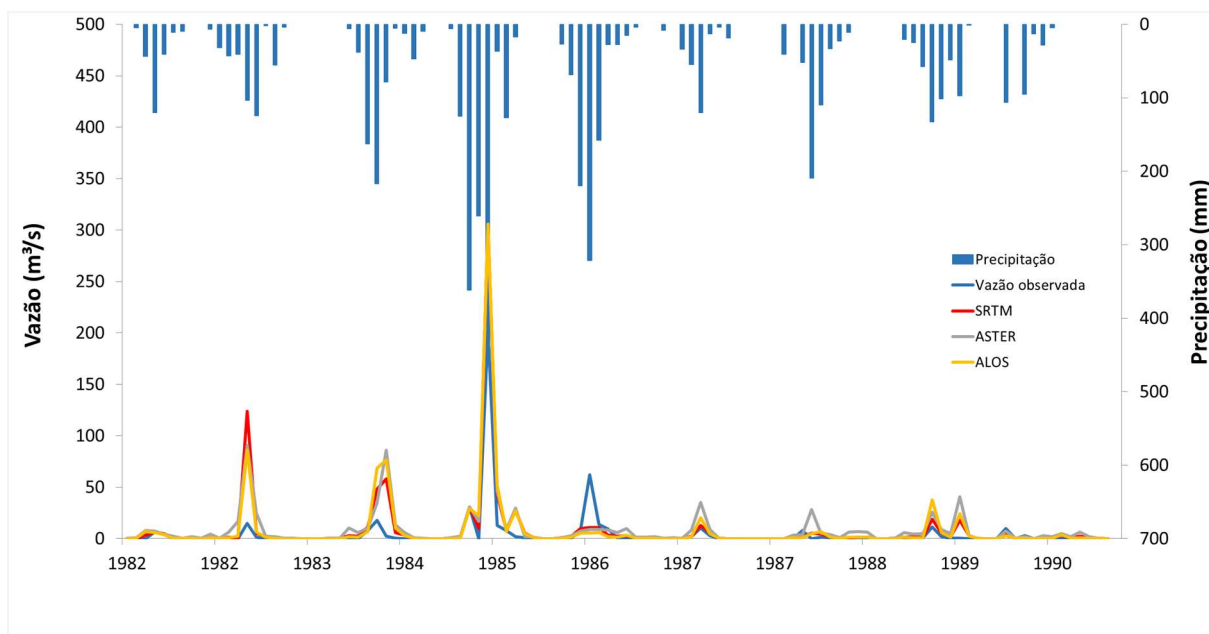


Figura 10 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas na bacia quando simuladas diferentes fontes de obtenção do MDE.

Tabela 15- Coeficientes estatísticos das simulações de vazão com diferentes fontes de obtenção do MDE.

| MDE   | R <sup>2</sup> | Nash |
|-------|----------------|------|
| SRTM  | 0,89           | 0,31 |
| ALOS  | 0,89           | 0,26 |
| ASTER | 0,89           | 0,30 |

Para os três MDEs, a resposta do modelo tende a ter o mesmo comportamento na simulação dos processos hidrológicos, onde ele superestima as vazões observadas para os três cenários nos períodos chuvosos e apresentaram coeficientes estatísticos semelhantes, de R<sup>2</sup> satisfatório de 0.89 e NS insatisfatório de 0,26 a 0,31. Dessa forma, qualquer um dos produtos que se utilize, vai estimar semelhante.

Visto isso, entende-se que as vazões simuladas pelo SWAT+ não variaram significativamente entre os diferentes cenários de MDE. As maiores diferenças nos resultados partiram da comparação das características da bacia quanto a resolução espacial, onde as imagens que eram de resolução mais alta conseguiram discretizar melhor a bacia, representando melhor seu contorno e traçando seus rios mais sinuosos e influenciando na divisão de suas subbacias e gerando maiores números de HRUs devido a variação da altitude do local em cada imagem. O mesmo foi observado por Tan et al. (2015) e Liu et al. (2014), quanto testaram a influência da resolução espacial do MDE na versão anterior do modelo SWAT. Todavia, para

essa bacia do semiárido, uma discretização mais detalhada acaba gerando respostas semelhantes aos de menores resoluções, apesar de ser melhor discretizada, o que permite o usuário optar por essas imagens de resolução mais baixa, de forma a facilitar seu processamento e continuar com bons resultados da representação. Para as simulações de fluxo o modelo conseguiu, em sua estimativa, acompanhar o comportamento da vazão em todos os meses que houve eventos de chuva que geraram escoamento. Para melhorias na estimativa, pode optar-se por fazer uma calibração do modelo em um momento posterior.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo avaliou os efeitos de nove resoluções espaciais de MDE (30 a 1500 m) e três produtos de diferentes fontes de obtenção (SRTM, ALOS, ASTER) na discretização de uma bacia hidrográfica da região semiárida e nas saídas das vazões simuladas para essa bacia no modelo SWAT+. As diferenças mais proeminentes entre esses produtos de diferentes resoluções é a perda de informação topográfica do terreno, onde o MDE não consegue representar os pontos mais altos da bacia e a amplitude de elevação diminui à medida que a resolução espacial diminui. Esse fator influencia diretamente na discretização da bacia. É observado que o comprimento dos rios e a altitude do terreno diferem substancialmente devido as resoluções do produto, o que leva a diferentes quantidades de sub-bacias e HRUs geradas, podendo influenciar no resultado da simulação do escoamento. Todavia, quanto aos produtos SRTM, ALOS e ASTER, de mesma resolução de 30 m, não apresentaram diferenças significativas nas características da bacia hidrográfica.

Os resultados do estudo mostram que as diferenças entre as resoluções espaciais causam efeito na estimativa do escoamento, embora de forma moderada. Para uma bacia do semiárido, com precipitação concentrada em um intervalo de 4 meses, o modelo conseguiu gerar uma resposta para todos os eventos de chuva que geraram escoamento. Todavia, o SWAT+ tende a superestimar as vazões de pico, o que leva a necessidade de ajuste de alguns parâmetros. O gráfico geral com todos os hidrogramas das vazões simuladas permite a comparação de como cada resolução influencia na saída do modelo, apontando que todas as séries de vazões geradas apresentam um mesmo comportamento nos resultados. Ainda assim, os de resolução mais alta (30 a 100 m) são os produtos que mais superestimam a vazão. Os de resolução mais baixa (200 a 1500 m), a medida em que vão diminuindo, tendem a diminuir também a vazão de pico. Isso levou a um melhor valor estatístico de NS, visto que essas resoluções trouxeram um melhor ajuste. Quando aos produtos de 30m originários de diferentes fontes, as simulações tendem a gerar resultados parecidos, não tendo impacto direto na resposta do modelo.

O estudo também mostrou que, embora haja diferença na superestimação das vazões de pico, analisando o hidrograma e os índices estatísticos, pode-se observar que o modelo não é tão sensível a essa mudança quando simula o escoamento superficial na bacia. Esse é um fator que facilita para o usuário do modelo ao trabalhar com grandes bacias do semiárido, dando a possibilidade de optar por fazer a modelagem das vazões com produtos de resolução mais baixa, gerando, ainda assim, bons resultados e melhorando o processamento em questão de tempo e capacidade da máquina utilizada.

No entanto, é importante ressaltar que, apesar da estimativa da vazão no SWAT+ não ser muito sensível às diferentes resoluções espaciais da topografia do terreno, ele pode ser sensível para a simulação de outras variáveis existentes no modelo, como o transporte de nutrientes e a produção de sedimentos.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

Para estudos futuros, sugere-se que seja feita a avaliação do impacto da resolução do MDE em outras variáveis do modelo, como na produção de sedimentos e nos constituintes da qualidade da água. Além disso, pode ser feita a quantificação das incertezas do MDE em simular os processos hidrológicos em períodos de eventos extremos como inundações ou secas do semiárido. Pode-se, também, testar o uso de diferentes resoluções em outras entradas de modelo, como mapas de uso da terra ou mapas de solo, e investigar seus impactos na sensibilidade dos parâmetros e rendimentos da bacia.

## REFERÊNCIAS

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. Journal of Hydrology, v.87, p.45–59.1986.

ARAÚJO, K. D. et al. Análise das condições meteorológicas de São João do Cariri no semiárido paraibano. GEOGRAFIA Revista do Departamento de Geociências, v. 14, n. 1, p. 61–72, 2005.

ARAUJO, K. D. Caracterização geral da Estação Experimental Bacia Escola 2006 (Revisão de Literatura).

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I: Model development. 1998. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n.1, 1998, p. 73-89.

ARNOLD, J. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n.3, 2007.885-900p.

ARNOLD, J. G.; BIEGER, K.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; DUNBAR, J. A.; ALLEN, P. M. Use of Decision Tables to Simulate Management in SWAT+. Water, v.10, 713. 2018.

BIEGER, K. et al. Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. Journal of the American Water Resources Association, v. 53, n. 1, p. 115–130, 2017.

BIEGER, K.; ARNOLD, J. G.; RATHJENS, H.; WHITE, M. J.; BOSCH, D. D.; ALLEN, P. M. Representing the Connectivity of Upland Areas to Floodplains and Streams in SWAT+. Journal of the American Water Resources Association, v. 55, n. 3, 2019.

BRESSIANI, D. DE A. et al. A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.

BONUMÁ, N. B., REICHERT, J.M., MINELLA, J.P., BARROS, C.A.P., RODRIGUES, M. F., BUARQUE, D.C. (2010). Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: *Anais do IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*. Brasília: ABRH.

CARVALHO NETO, J.G. Simulação hidrossedimentológica da bacia do riacho dos namorados com o modelo SWAT. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Campina Grande, Campina Grande – PB, 2011. 215f.

CARVALHO NETO, J.G.; SRINIVASAN, V.S.; RUFINO, I.A.A. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na Bacia Hidrográfica do Riacho dos Namorados no Cariri Paraibano. *Revista Geográfica Acadêmica*, 5(2): 30-40. 2011.

CHAPLOT, V. 2014. Impact of spatial input data resolution on hydrological and erosion modeling: recommendations from a global assessment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67e69, 23e35.

CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; VASCONCELOS, A. C. F. (2002). Salinidade das águas superficiais e suas relações com a natureza dos solos na Bacia Escola do açude Namorados. Campina Grande: BNB/UFPB. p. 54.

CHRISTOFOLETTI, A. 1999. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blücher. 236 pp.

DANTAS, J.C. Processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Taperoá. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba – João pessoa, PB. 2016. 83p.

FERRIGO, S. 2014. Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do Lago Descoberto – DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 147 p.

FONTES JÚNIOR, R.; MONTENEGRO, A. Impact of land use change on the water balance in a representative watershed in the semiarid of the State of Pernambuco using the SWAT model. *Engenharia Agrícola*, v. 39, n. 1, p. 110–117, 2019.

FUKUNAGA, D. C., Estimação de vazão em bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. JERÔNIMO MONTEIRO – ES. 2012. 98f.: il.

GARBRECHT, J; OGDEMEN, F. L.; DEBARRY, P. A.; MAIDMENT, D.R. (2001). “GIS and distributed watershed models: I, Data coverages and sources”. *Journal os Hydrologic Engineering*, v.6, n. 6, p. 506-514.

GASSMAN, P. W; REYES, M. R; GREEN, C. H; ARNOLD, J. G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 50(4): pp. 1211-1250.

GREEN, W. H. e AMPT, G. A. (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *The Journal of Agricultural Science*, v. 4(1), p. 1-24.

KAISER, I. M. Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos. 2006. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. 273p.

KALIN, L.; HANTUSH, M. Duration and a Nonlinear I a - S Relation. *Jornal of Hydrologic Engeneering*, 11(6), p. 631–635, 2006.

KNISEL, W.G. 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C.: USDA National Resources Conservation Service.

LETTENMAIER, D. P.; ALSDORF, D.; DOZIER, J.,; HUFFMAN, G. J.; PAN, M.; WOOD, E. F. (2015). Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resources Research*.

LIMA, J. E. F. W. 2010. Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 312p.

MENDONÇA, F. & DANNI-OLIVEIRA, I.M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 206p.

MENDONÇA, L. R.; GUIMARÃES, G. N.; GALLIS, R. B.; BARBOSA, E. L. Geração de um mdt a partir de um sistema de mapeamento móvel terrestre para fins de planejamento urbano. 2018. 13º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial. Florianópolis – SC.

MEDEIROS, I.C.; SILVA, R.M. 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.

MORAIS, R. C. D.; SALES, M. C. L. (2016). Extração automática de drenagem: uma análise comparativa a partir de diferentes ferramentas e bases de dados. Revista Brasileira de Geografia Física v.09, n.06 (2016) 1849-1860.

MOREIRA, G. T. G. Metric for evaluate the hydrological inconsistency of terrains represented by DEM. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Metodologias e técnicas da Computação; Sistemas de Computação) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.MORIASI, D. N.;

MUNOTH, P.; GOYAL, R. Effects of DEM Source, Spatial Resolution and Drainage Area Threshold Values on Hydrological Modeling. Water Resources Management, p. 3303–3319, 2019.

NAGAVENI, C.; KUMAR, K. P.; RAVIBABU, M. V. Evaluation of TanDEMx and SRTM DEM on watershed simulated runoff estimation. Journal of Earth System Science, v. 128, n. 1, p. 1–11, 2019.

NASCIMENTO, S. S.; ALVES, J. J. A. Ecoclimatologia do cariri paraibano. Revista Geográfica Acadêmica, Boa Vista, v. 2, n. 3, p. 28-41, 2008.

NEITSCH, S. L. et al. SWAT 2009 Theoretical Documentation. Agricultural Reserach Service. Texas A&M University System., p. 618p., 2011.

NKWASA, A; CHAWANDA, C. J.; MSIGWA, A.; KOMAKECH, H. C.; VERBEIREN, B.; GRIENSVEN, A.; How Can We Represent Seasonal Land Use Dynamics in SWAT and SWAT+ Models for African Cultivated Catchments?. Water 2020, v. 12, n. 1541.

OLIVEIRA, A. M. Contribuições de estimativas de sensoriamento remoto para a modelagem de múltiplas variáveis hidrológicas. 137f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2020.

OLIVEIRA, D. R.; CICERELLI, R. E.; ALMEIRA, T.; MAROTTA, G. S. Geração de modelo digital do terreno a partir de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado. *Revista Brasileira de Cartografia* (2017), Edição de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Nº 69/6: 1143-1151.

OLIVEIRA, R. A.; TOMMASELLI, A. M. G. Geração automática de modelo digital de superfície utilizando múltiplas imagens. III Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente - SP, 26-28 de julho de 2012. v.1.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. *Hidrologia Básica*. Edgard Blücher, São Paulo. 1976. 278 p.

RALLISON, R. E.; MILLER, N. Past, present and future SCS runoff procedure. P. 353-364. In V.P. Singh (ed.). *Rainfall runoff relationship*. Water Resources Publication, Littleton, CO. 1981.

REDDY, S.; REDDY, J. M. Evaluating the influence of spatial resolutions of DEM on watershed runoff and sediment yield using SWAT. *Journal of Earth System Science*, v. 124, n. 7, p. 1517–1529, 2015.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas - relatório técnico parcial. MCT/INPE. São José dos Campos: INPE, 2000. 60p.

ROOSTAEE, M.; DENG, Z. (2018). “Uncertainty Analysis of Watershed-Based Flow and Water Quality Modelling with Different DEM Data Sources” in *EPiC Series in Engineering*, 13th International Conference on Hydroinformatics, v. 3, p. 1778 – 1786.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; PAIVA, F. M. L. Modelagem hidrossedimentológica de uma microbacia da bacia experimental de São João do Cariri. In XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa. 2005.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. OKARA: Geografia em debate, v. 1, n. 1, p. 16–32, 2007.

SANTOS, J. DOS; SANTOS, C.; SILVA, R. DA. Análise das perdas de água e solo no semiárido paraibano utilizando simulador de chuva. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011.

SANTOS, J. Y. G.; SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Aplicação do modelo SWAT para a estimativa da produção de sedimentos na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. João Pessoa – PB. 2014.

SANTOS, J. Y. G. Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Tapacurá (Pernambuco – Brasil). 205f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 5, p. 520–526, 2008.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Influência da cobertura vegetal nos processos hidrossedimentológicos no semiárido do Nordeste, Brasil. v. 1, p. 113–125, 2009.

SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: A case study of Tapacurá catchment. Natural Hazards, v. 62, n. 3, p. 953–970, 2012.

Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., et al. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. Hydrological Sciences Journal.

SOUZA, B. I. DE; SILANS, A. M. B. P. DE; SANTOS, J. B. DOS. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 8, n. 2–3, p. 292–298, 2004.

SOUZA, B. I. Cariri Paraibano: do silêncio do lugar à desertificação. 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.

SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. D. 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.

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. Bacia Experimental de Sumé: Instalação e primeiros resultados. Recife, 1983.

TAVARES, V. C.; RAMOS, N. L. *Revista Brasileira de Geografia* (Vol.57). *Revista Brasileira de Geografia*, v. 7, p. 1384–1399, 2016.

TAN, M. L.; FICKLIN, D. L.; BARNALI, D.; IBRAHIM, A. L.; YUSOP, Z.; CHAPLOT, V. Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow. *Applied Geography*. V. 63, p. 357-368. 2015.

TUCCI, C. E. M. 1998. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre – RS. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 652p.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sol. 130p.

WU, J.; Yen, H.; ARNOLD, J.G.; YANG, Y.C.E.; CAI, X; WHITE, M.J; SANTHI, C., MIAO, C; SRINIVASAN, R. Development of reservoir operation functions in SWAT+ for national environmental assessments. *Journal of Hydrology*, v. 583, n. 124556, 2020.

XU, F.; DONG, G.; WANG, Q.; LIU, L.; YU, W.; MEN, C.; LIU, R. Impacts of DEM uncertainties on critical source areas identification for non-point source pollution control based on SWAT model. *Journal of Hydrology*, v. 540, p. 355–367, 2016.

YEN, H. et al. IPEAT+: A Built-In Optimization and Automatic Calibration Tool of SWAT+. *Water*, v. 11, n. 8, p. 1681, 2019.

ZHAO, G.; GAO. J.; TIAN, P.; TIAN, K. (2009) “Comparison of two different methods for determining flow direction in catchment hydrological modeling”. *Water Science and Engineering*, 2009, 2(4): 1-15.