

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS CAMPUS JUVINO OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NAS VAZÕES DO RIO
PERUIPE – BA**

PATRICK DOS SANTOS SILVA

ITAPETINGA – BA

AGOSTO - 2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS CAMPUS JUVINO OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NAS VAZÕES DO RIO
PERUIPE – BA**

Autor: Patrick dos Santos Silva

Orientador: Profº Dr. Danilo Paulúcio da Silva
Co-orientadores: Flávia Mariani Barros

Dissertação apresentada como parte das exigências para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS, no Programa De Pós-Graduação Stricto sensu em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – Área de concentração: Meio Ambiente e Desenvolvimento.

ITAPETINGA – BA

AGOSTO - 2021

551.48
S582i

Silva, Patrick dos Santos.

Influência da silvicultura de eucalipto nas vazões do Rio Peruípe – BA /
Patrick dos Santos Silva. – Itapetinga-BA: Universidade Estadual do
Sudoeste da Bahia, 2021.
89 fl.

Dissertação apresentada como parte das exigências para a obtenção do
título de MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS, no Programa De Pós-
Graduação Stricto sensu em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do
Sudoeste da Bahia – Área de concentração: Meio Ambiente e
Desenvolvimento. Sob a orientação do Prof. D. Sc. Danilo Paulúcio da Silva e
coorientação da Profª. D. Sc. Flávia Mariani Barros.

1. Vazão de água – Cultura do eucalipto – Rio Peruípe – BA. 2.
Modelagem hidrológica – Vazão de bacia – Balanço hídrico. 3. Eucalipto –
Vazão de água – Modelagem hidrológica - SWAT. I. Universidade Estadual
do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.
II. Silva, Danilo Paulúcio da. III. Barros, Flávia Mariani. IV. Título.

CDD(21): **551.48**

Catálogo na fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB/5-535

Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para Desdobramento por Assunto:

1. Rio Peruípe – BA - Vazão de água - Cultura do eucalipto
2. SWAT - Modelagem hidrológica
3. Bacias hidrográficas - Usos e ocupação

PATRICK DOS SANTOS SILVA

“INFLUÊNCIA DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NAS VAZÕES DO RIO
PERUIPE– BA”.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus* de Itapetinga, BA. Área de
Concentração: Meio Ambiente e Desenvolvimento.

Aprovada em: 30/06/2021

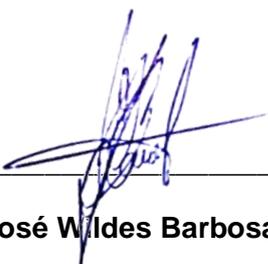
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Danilo Paulucio da Silva (Orientador/UESB)



Prof. Dr. Felizardo Adenilson Rocha (IFBA)



Prof. Dr. José Wildes Barbosa Santos (UESB)

AGRADECIMENTOS

À Deus, dono de todas as coisas, fonte de bondade e amor.

Ao meu Pai, Egivaldo, por toda compreensão, dedicação e paciência nos momentos difíceis.

Aos meus avós, Celina e Lourival por terem me criado e me proporcionado amor e acolhimento.

À Ana Vitoria, minha sobrinha, que trouxe ternura e mais alegria a nossa família.

À Jhones pela amizade e comprometimento em me ajudar na pesquisa me auxiliando tecnicamente.

À Lais, por ter sido presente em nosso grupo de pesquisa, sempre disposta a me ajudar e solucionar minhas dúvidas.

Ao professor Danilo Paulúcio, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos durante a jornada, e valiosos conselhos.

Aos professores Felizardo Rocha, Carolina e José Wildes, pela participação e valiosas sugestões nas bancas de qualificação e defesa.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais pela oportunidade.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 | 12 |
| Revisão de literatura: Modelagem hidrológica para análise de alterações nas vazões de cursos d'água em decorrência mudanças no uso e ocupação do solo | 12 |
| 1. Introdução Geral | 12 |
| 2. Gestão de Recursos Hídricos | 15 |
| 3. Bacias Hidrográficas e Hidrologia | 16 |
| 4. Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe | 16 |
| 5. Ciclo Hidrológico | 18 |
| 6. Modelagem Hidrológica | 19 |
| 7. Soil and Water assessment Tool (SWAT) | 22 |
| 8. Balanço Hídrico | 24 |
| 8.1 Escoamento Superficial | 24 |
| 8.2 Evapotranspiração | 25 |
| 8.3 Escoamento subterrâneo | 26 |
| 8.4 Escoamento Lateral | 29 |
| 9. Análise de Sensibilidade do Modelo | 29 |
| 10. Calibração e Validação do Modelo | 31 |
| 10.1 Análise de incerteza | 32 |
| 11. Obtenção de Dados Climáticos | 36 |
| 12. Referências | 37 |
| Capítulo 2 | 42 |
| 1 Introdução | 43 |
| 2 Material e métodos | 46 |
| 1.1 Clima | 47 |
| 1.2 Vegetação e Geomorfologia | 47 |
| 1.3 Obtenção dos Dados de Entrada do Modelo SWAT para a Bacia do Rio Peruípe | 48 |
| 1.4 Dados Climáticos | 48 |
| 2.4.1 Declividade | 49 |
| 2.4.2 Uso e Ocupação | 49 |
| 2.4.3 Tipos de Solo | 51 |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.5 | Discretização das Subbacias e HRU's | 52 |
| 2.6 | O modelo SWAT..... | 53 |
| 2.7 | Análise de Sensibilidade | 55 |
| 2.8 | Calibração e Validação..... | 56 |
| 2.9 | Avaliação de Desempenho | 57 |
| 3 | Resultados e Discussão..... | 58 |
| 3.1 | Análise de Sensibilidade | 58 |
| 3.2 | Calibração e Validação..... | 61 |
| 4 | Conclusão | 65 |
| 5 | Referências | 66 |
| Capítulo 3 | | 70 |
| 1 | Introdução | 71 |
| 2 | Material e métodos | 73 |
| 2.1 | Área de estudo..... | 73 |
| 2.3 | Cenários (Mapa dos cenários)..... | 75 |
| 2.4 | Avaliações dos cenários | 77 |
| 3 | Resultados e discussão..... | 78 |
| 3.1 | Avaliação dos cenários a partir da análise de componentes do balanço hídrico..... | 78 |
| 3.2 | Vazões Mínimas..... | 80 |
| 3.2.1 | Curvas de Permanência | 80 |
| 3.3 | Vazões médias..... | 82 |
| 3.4 | Vazões médias Anuais | 83 |
| 3.5 | Vazões médias Mensais | 85 |
| 3.6 | Vazões Máximas | 87 |
| 4 | Conclusão..... | 88 |
| 5 | Referências..... | 89 |

RESUMO

SILVA, P. S. Influência Da Silvicultura De Eucalipto Nas Vazões Do Rio Peruípe – Ba. Itapetinga – BA; UESB, 2021, 89p. (Dissertação – Mestrado em Ciências Ambientais – Área de concentração em Meio Ambiente e Desenvolvimento).*

A crise hídrica que ocorre em certas regiões do planeta não é unicamente responsabilidade das secas, mas também dos extremos hidrológicos, intensos eventos de precipitação que são igualmente danosos ao ambiente em geral. Para projetar cenários a fim de avaliar variações nos ciclos hidrológicos a modelagem e simulação tem se destacado, baseando-se nas estatísticas de incertezas e em métodos numéricos. Essa ferramenta torna mais simples as previsões de sistemas hidrológicos complexos, como a relação produção de água *versus* silvicultura. Em especial a cultura do eucalipto em algumas bacias hidrográficas do Brasil é visto como problema, pois muitos estudos nos trazem hipóteses de que o cultivo do eucalipto é capaz de promover a desertificação de áreas ecologicamente equilibradas. Sabe-se que os municípios de Caravelas e Nova Viçosa situados no extremo sul da Bahia, estão entre os 13 municípios com maior área plantada de eucalipto do país, essas cidades estão também localizadas na bacia do rio Peruípe, sendo vegetada atualmente por eucalipto em 35% de sua área, esse percentual era de apenas 3% em 1990. Frente à problemática do aumento da produção em larga escala de eucalipto na bacia hidrográfica do rio Peruípe, esse trabalho objetiva avaliar a influência da cultura do eucalipto no comportamento hidrológico da vazão da Bacia em questão, por meio de modelagem hidrológica, utilizando o *software Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). O modelo utiliza como dados de entradas informações sobre topografia (obtido a partir do modelo digital de elevação – *United State Geological Survey* - USGS), classes de solo (obtido da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA) e cobertura do solo (obtido a partir de imagens de satélites Landsat 8 OLI/TIRS), dados climáticos diários, bem como dados fluviométricos, coletados na estação Helvecia. O trabalho foi realizado em interface associada a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), sendo utilizado o ArcSWAT versão 2012 associado com o ArcGIS. Para avaliação do desempenho do modelo foram utilizados o coeficiente de Nash-Sutcliffe, percentual de Viés e coeficiente de Determinação como estatística de desempenho. O projeto foi calibrado e validado para 11 anos (2005 a 2013) e 22 anos (1980 a 2002) respectivamente. Nas análises de mudança de cenários foram considerados 4 cenários distintos: cenário A (cenário atual), cenário B (cenário onde houve a substituição de toda área de eucalipto por pastagem), cenário C (cenário onde houve a substituição de toda pastagem por eucalipto) e cenário D (cenário onde houve a substituição do eucalipto por mata nativa). Foram mantidos os demais usos em todos os cenários. Os resultados para calibração sem refinamento foram de 0.72 para R^2 , 0.71 para NSE e 5.4 para o PBIAS. Enquanto os fatores P e R resultaram em 0.86 e 1.58 respectivamente para escala. Os resultados da validação foram de 0.63 para R^2 , 0.58 para NSE e 9.9 para o PBIAS. Para avaliação das vazões nos cenários, indicaram maiores escoamentos superficiais em áreas de pastagens. Observou-se também redução das vazões médias e mínimas no cenário C, aumentando ainda neste cenário a lamina de evapotranspiração. Com relação a vazões mínimas, observou-se aumento da Q_{90} (vazão com 90% de permanência) para o cenário D em relação ao cenário A.

Palavras Chave: Modelagem hidrológica, balanço hídrico, SWAT.

*Orientador: Prof. Dr. Danilo Paulúcio da Silva

ABSTRACT

SILVA, P. S. Influence of Eucalyptus Silviculture on the Flows of the Peruípe River – BA. Itapetinga – BA; UESB, 2021, 89p. (Dissertation - Master's Degree in Environmental Sciences - Area of concentration in Environment and Development).*

The water crisis that occurs in certain regions of the planet is not only the responsibility of droughts, but also of hydrological extremes, intense precipitation events that are equally harmful to the environment in general. Based on uncertainty statistics and numerical methods, modeling and simulation have been highlighted to design scenarios in order to evaluate variations in hydrological cycles. This tool makes predictions of complex hydrological systems, such as the relationship between water production versus forestry, simpler. In particular, the cultivation of eucalyptus in some hydrographic basins in Brazil is seen as a problem, as many studies bring us hypotheses that the cultivation of Eucalyptus is capable of promoting the desertification of ecologically balanced areas. It is known that the municipalities of Caravelas and Nova Viçosa, located in the extreme south of Bahia, are among the 13 municipalities with the largest eucalyptus planted area in the country, these cities are also located in the Peruípe river basin, being currently vegetated by Eucalyptus in 35 % of its area, this percentage was only 3% in 1990. It is known that the municipalities of Caravelas and Nova Viçosa, located in the extreme south of Bahia, are among the 13 municipalities with the largest Eucalyptus planted area in the country, these cities are also located in the Peruípe River Basin, being currently vegetated by Eucalyptus in 35% of its area, this percentage was only 3% in 1990. Faced with the problem of increasing the large-scale production of Eucalyptus in the Peruípe River Basin, this study aims to evaluate the influence of Eucalyptus culture on the hydrological behavior of the flow of the analyzed basin, through hydrological modeling, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The model uses as input data information on topography (obtained from the digital elevation model - United State Geological Survey - USGS), soil classes (obtained from the Brazilian Agricultural Research Corporation - EMBRAPA) and land cover (obtained from Landsat 8 OLI/TIRS satellite images), daily climate data, as well as fluviometric data, collected at the Helvecia station. The work was performed in an interface associated to a Geographic Information System (GIS), using ArcSWAT version 2012 associated to ArcGIS. To evaluate the performance of the model, the Nash-Sutcliffe coefficient, the percentage of bias and the coefficient of determination were used as performance statistics. The project was calibrated and validated for 11 years (2005 to 2013) and 22 years (1980 to 2002) respectively. For the scenarios assessment, 4 different scenarios were considered: scenario A (current scenario), scenario B (scenario where the entire area of Eucalyptus was replaced by pasture), scenario C (scenario where all pasture was replaced by Eucalyptus) and scenario D (scenario where Eucalyptus was replaced by native forest). The other soil uses were maintained in all scenarios. The results for calibration without refinement were 0.72 for R^2 , 0.71 for NSE and 5.4 for PBIAS. While the P and R factors resulted in 0.86 and 1.58 respectively for scale. The validation results were 0.63 for R^2 , 0.58 for NSE and 9.9 for

PBIAS. The evaluation of the flows in the scenarios indicated higher surface runoff in pasture areas. A reduction in the average and minimum flows was also observed in scenario C, with an increase in the evapotranspiration depth. Regarding minimum flows, an increase in Q90 (flow with 90% permanence) was observed for scenario D in relation to scenario A.

Keywords: Hydrological modeling, water balance, SWAT.

*Advisor: Prof. Dr. Danilo Paulucio da Silva

LISTA DE ABREVIATURAS

- δgw - Tempo de atraso ou de drenagem das formações geológicas em dias
- β_{deep} - Coeficiente de percolação do aquífero (adimensional)
- ρ_{ar} - Densidade do ar em kg m^{-3}
- Φ_d - Porosidade do solo (mm mm^{-1})
- Δ - Relação da declividade da curva da pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
- ΔT - Intervalo de tempo (dias)
- α_{gw} - Constante da recessão do escoamento de base (adimensional)
- γ - Constante psicométrica em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
- λE - Densidade de fluxo de calor latente em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.
- AGWA - Ferramenta de avaliação automatizada de bacias hidrográficas geoespaciais
- $aq_{sh,i}$ - Quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm)
- $aq_{sh,i-1}$ - Quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm)
- BASINS - Better Assessment Science que integra fontes pontuais e não pontuais
- c_p - Calor específico em pressão constante em $\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$
- DEWPT - Média diária do ponto de orvalho para determinado mês
- Ea - Evapotranspiração no dia i (mm)
- e_z^0 - Pressão do vapor na saturação na altura z em kPa
- e_z - Pressão de vapor de água na altura z em kPa
- fator P – Percentagem dos dados medidos delimitados pela incerteza de predição de 95% (95PPU)
- fator R – Espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos
- FC_{ly} - Capacidade de campo de determinada camada do solo (mm)
- FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
- G - Densidade do fluxo de calor para o solo em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
- HSPF - Programa de Simulação Hidrológica – FORTRAN
- Ho- Radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)
- H_{net} - Radiação em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
- It - Infiltração acumulada no tempo (mm)

K_{sat} - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1})

k_e - Condutividade hidráulica efetiva do solo (mm hr^{-1})

KINEROS2 – Modelo distribuído de escoamento cinemático e erosão

L_{hill} - Comprimento da rampa.

MIKE SHE - Système Hydrologique Européen - Sistema integrado de modelagem hidrológica para a construção e simulação do fluxo de águas superficiais e subterrâneas

n - Número de pares observados e simulados

NSE- Coeficiente de Nash-Sutcliffe

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PCPMM - média mensal da precipitação total;

PCPSTD - desvio padrão para a precipitação diária do mês;

PCPSKW - coeficiente de assimetria para a precipitação máxima;

PR_W1 - probabilidade de dias úmidos seguido de dias secos para determinado mês

PR_W2 - probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos para determinado mês

PCPD - Média mensal de dias de precipitação

PBIAS – Percentual de viés

$q_{shthr,q}$ - Limite admitido pelo usuário do nível de água no aquífero raso para que possa ocorrer o fluxo de base (mm)

Q_{surf} - Quantidade de escoamento superficial no dia i (mm)

Q_{gw} - Quantidade de fluxo de retorno no dia (mm)

$Q_{gw,i}$ - Fluxo de água subterrânea para o canal no dia i (mm)

$Q_{gw,i-1}$ - Fluxo de água subterrânea para o canal no dia $i-1$ (mm)

Q_{lat} - Escoamento lateral para um dado dia i (mm)

$Q_{s,m}$ - Vazão média simulada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

$Q_{o,i}$ - Vazão observada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

$Q_{s,i}$ - Vazão simulada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

$Q_{o,m}$ - Vazão média observada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

R^2 - Coeficiente de Determinação

R_{day} - Quantidade de precipitação no dia i (mm)

r_a - Resistência aerodinâmica em s m^{-1}

r_c - Resistência do dossel da vegetação em s m^{-1}

SOLARAV - Média de radiação solar diária para um determinado mês

SW_0 - Quantidade inicial de água no solo no dia i (mm)

$SW_{ly.excess}$ - Volume de água drenável na camada saturada de solo (mm)

SW_t - Quantidade final de água no solo (mm)

slp - Declividade da sub-bacia ($m\ m^{-1}$)

SW_{ly} - Umidade da camada do solo em determinado dia (mm)

SCS – Serviço de Conservação do Solo

t - é o tempo (dias)

$W_{rchr,sh}$ - Quantidade de água que reabastece o aquífero raso no dia i (mm)

W_{revap} - Quantidade de água que retorna à zona de raízes em resposta às deficiências hídricas no dia i (mm)

$W_{pump,sh}$ - Quantidade de água retirada do aquífero por bombeamento no dia (mm)

$W_{rchr,i}$ - Quantidade de água que penetra no aquífero no dia i (mm)

$W_{rchr,i-1}$ - Quantidade de água que penetra no aquífero no dia $i-1$ (mm)

W_{deep} - Corresponde a quantidade de água que se desloca para o aquífero profundo no dia i (mm)

W_{rchr} - Quantidade de recarga entrando em ambos os aquíferos no dia i (mm)

W_{seep} - Quantidade de água que entra na zona vadosa no dia i (mm)

PTDRSS - Plano Territorial de Desenvolvimento Sustentável e Solidário do Extremo Sul

TMPMX - média mensal de temperatura máxima diária

TMPMN - média mensal de temperatura mínima diária

TMPSTDMX - desvio padrão para a temperatura máxima de cada mês;

TMPSTDMN - desvio padrão para a temperatura mínima de cada mês;

RAINHHMX - Valor máximo de meia hora de chuva em topo o período de registros de um determinado mês

WNAV - Média diária da velocidade do vento para determinado mês

SWAT – Soil & Water Assessment Tool

WAM - Watershed Assessment Model

WARMF - Watershed Analysis Risk Management Framework

WEPP - Watershed Erosion Prediction Project

95PPU - Incerteza de predição de 95%

Capítulo 1

Revisão de literatura: Modelagem hidrológica para análise de alterações nas vazões de cursos d'água em decorrência mudanças no uso e ocupação do solo

1. Introdução Geral

A cultura do eucalipto em algumas bacias do Brasil é tida como problema, sendo indicado em alguns estudos como o principal motivo de conflitos socioambientais e agente causador de danos hidrológicos (BAHIA, 2004; ALMEIDA, 2009). Como também afirma Lanza (2015), o cultivo de eucalipto em detrimento da pastagem, potencializa o aumento das perdas de água por evaporação, reduzindo a disponibilidade dela.

É sabido que a chegada do eucalipto no Brasil é datada de aproximadamente 1868, sendo primeiramente implantada no Rio Grande do Sul, e para fins decorativos (VIANA, 2004). Almeida *et al.* (2008) destacam que, visando o capital gerado pela cultura, na década de 1970 o Governo Federal passou a estimular o plantio de eucalipto no território nacional, e nos anos seguintes, aproximadamente 1980, surge na região Extremo-Sul do Estado da Bahia as primeiras unidades de produção e empresas, atraídas pelo conjunto de condições que tornava o cultivo do eucalipto rentável.

A Bahia passou a despontar, estando entre os primeiros estados do Brasil na produção nacional de papel e celulose (ALMEIDA *et al.*, 2008; ALMEIDA, 2009). Esse destaque só foi possível pelas condições favoráveis ao cultivo, uma vez que na região o eucalipto desenvolveu-se com grau de produtividade cerca de cinco vezes maior que em outras regiões do país, motivo pelo qual contribui para a rápida expansão das áreas cultivadas, para o abastecimento de fábricas já instaladas em Minas Gerais, Espírito Santo e, posteriormente no próprio Estado (BAHIA, 2008). A Bahia, ou mais especificamente o extremo Sul Baiano, alavancou-se como uma das regiões mais produtivas do mundo. Logo, o extremo Sul Baiano carregou o maior mérito de produção, posicionando-se como segundo maior produtor de papel e celulose do país, sendo destinado ao mercado externo (ALMEIDA *et al.*, 2008). Há quatro anos, o Plano Territorial de Desenvolvimento Sustentável e Solidário do Extremo Sul – Bahia (PTDRSS) (2016) apresentou a região como a maior produtora de papel e celulose entre as regiões baianas.

Com a expansão do cultivo do eucalipto, conflitos socioambientais têm ocorrido na região, e vários são os motivos, como questões fundiárias, a problemática do carvão,

questões indígenas, roubo de madeira, desmatamento (BAHIA, 2008) e prejuízos para o ciclo hidrológico, afetando os recursos naturais, dentre eles, o solo, a fauna, a flora e a pressão sobre os recursos hídricos (IMA, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2008). Almeida (2009) apresenta que o uso e ocupação do solo desde a década de 1980 até aproximadamente 2007 sofreu bastante variação na região, sendo o eucalipto e a pastagem os principais motivos da variação espacial. Araujo (2019), estudando o comportamento hidrológico de aproximadamente 64% da área da bacia do rio Peruípe identificou aumento de 24,4% da área plantada de eucalipto entre 1989 e 2014.

No âmbito dos problemas ambientais gerados pela ação antrópica, Tundisi e Tundisi (2015) destacam que os problemas hídricos no planeta não estão relacionadas apenas aos eventos hidrológicos, destacando as intensas precipitações e secas prolongadas, mas também as atividades humanas, como o uso e ocupação do solo desordenado e gestão inadequada das águas, causando danos às propriedades, à saúde humana e ao funcionamento dos ecossistemas. O planejamento de bacias hidrográficas é necessário tendo em vista os usos crescentes por água, e os conflitos sobre disponibilidade deste recurso (DEUS e LATUF, 2019) para atender o aumento da demanda em quantidade e qualidade (LATUF, 2007).

A bacia hidrográfica é, neste sentido, a unidade de investigação e planejamento, sendo necessário o conhecimento de suas características físicas e hidrológicas para dar início aos estudos de gerenciamento dos recursos hídricos. Ceconi *et al.* (2018) explicam que adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento implica reconhecer que é sobre a mesma onde os resultados das ações antrópicas (degradação decorrente) refletem seus efeitos. O uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas interferem decisivamente no regime hidrológico, ocasionando variações expressivas tanto em termos de vazões máximas como de vazões mínimas (SANTOS, 2010; TUNDISI, 2006).

A promulgação da Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), objetiva assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, ao mesmo tempo em que busca a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos e o desenvolvimento sustentável (BRASIL, 1997), através da utilização racional e integrada dos recursos hídricos. Os fundamentos dessa política e os instrumentos por ela estabelecidos constituem não apenas um desafio político, econômico, social, ambiental e cultural, mas também um desafio de conhecimentos.

Assim, apesar dos avanços no campo das políticas ambientais e do conhecimento dos recursos hídricos, alguns desafios ainda permanecem e os crescentes conflitos ainda ocorrem por imprevisão, ou seja, devido ao planejamento inadequado, que em geral traduz a inexistência de informações confiáveis e de ferramentas para avaliação e monitoramento da situação dos recursos hídricos (SANTOS, 2010; ARAUJO, 2019).

Visando ao atendimento da demanda por informações para melhor gestão dos recursos hídricos, estudos têm sido amplamente realizados com o objetivo de melhorar a compreensão dos processos que controlam o movimento da água e consequentemente os impactos sobre a disponibilidade e qualidade da mesma (BLAINSKI *et al.*, 2017). Nesse sentido, modelos hidrológicos se consolidaram como ferramentas de representação desses processos com robustez no potencial para simulação de cenários, de alterações do uso do solo e de intervenções antrópicas (CARVALHO, 2014; BLAINSKI *et al.*, 2017) em diferentes escalas espaciais e temporais.

Cabe ressaltar que a bacia do rio Peruípe, apesar de ser uma área de elevada importância socioambiental e socioeconômica, carece de estudos relacionados com essa mudança acentuada no uso e ocupação, principalmente com a chegada da cultura do eucalipto, tornando necessária a aplicação de estudos no âmbito da modelagem hidrológica, para representação de cenários da bacia. Apesar da existência de estudos científicos na referida bacia contemplando a morfometria e uso e ocupação do solo e análise de vazões para cenário atual, a novidade deste trabalho trará uma perspectiva sobre as vazões em diferentes períodos de series históricas, aproveitando da modelagem para montar cenários e prever condições futuras. Os órgãos governamentais poderão trabalhar com assertivas e hipóteses trazidas neste estudo, podendo prever eventos de enchentes e secas em benefício da sociedade. A simulação de cenários faz-se pioneira na bacia do rio Peruípe, trazendo benefícios quanto a disponibilidade do recurso hídrico, além de subsídios informações para obras hidráulicas e trabalhos científicos.

Diante da problemática, o presente trabalho tem por finalidade identificar e avaliar os impactos que a implantação da cultura do eucalipto provocou na bacia do rio Peruípe, referente a vazões mínimas, médias e máximas deste rio a partir do modelo SWAT. Para atender tal objetivo, essa dissertação está estruturada em três capítulos, sendo o primeiro dedicado a revisão bibliográfica de temas relacionados à hidrologia e modelagem hidrológica. No segundo capítulo são apresentadas as análises de sensibilidade, calibração e validação diária para a bacia do rio Peruípe, o qual subsidiará

os resultados do terceiro capítulo. O terceiro e último capítulo são apresentados os resultados no regime de vazões concernente a mudanças de cenários, destacando o aumento da cultura de eucalipto na região.

2. Gestão de Recursos Hídricos

A disseminação de informações e condicionantes para um gerenciamento participativo e integrado, de acordo com as evoluções conceituais e estruturais do gerenciamento dos recursos hídricos, constitui em etapas fundamentais para um desenvolvimento equilibrado, em consonância tanto com as políticas ambientais quanto com a preservação do meio ambiente (SETTI, 2001).

O crescimento acelerado das cidades no mundo potencializa a ineficiência do armazenamento de água (MAEBARA e BARRETO, 2017; MIGUEL, 2018), levando em consideração a drenagem ineficiente, o aumento da evapotranspiração devido às ilhas de calor e conseqüentemente serviços de infraestrutura mais complexos e custosos (CIRILO, 2015; TUNDISI e TUNDISI, 2015). Ferreira e Uagoda (2017) relatam que a desigualdade entre a demanda e a disponibilidade de água tem motivado uma gestão dos recursos hídricos mais eficientes. Todavia Cirilo (2015), Ferreira e Uagoda (2017) concordam que os problemas da escassez hídrica no Brasil são resultados da combinação entre o crescimento de demandas específicas e da degradação da qualidade das águas, podendo citar processos erosivos, lançamento de efluentes e de defensivos agrícolas, evidenciando a necessidade de um gerenciamento integrado dos recursos hídricos.

De acordo com Uzeika (2009) todo e qualquer conjunto de ações voltadas para o uso dos recursos naturais, e nesse sentido o uso da água, tem seu efeito destacado quando a unidade de pesquisa e gestão é a bacia hidrográfica, pois nela é possível intersectar ao mesmo tempo aspectos condizentes com a bacia vertente e a calha fluvial.

Nesse sentido a bacia hidrográfica se consolida como ecossistema hidrologicamente integrado, com componentes e subsistemas interativos. No campo social, a unidade permite que a população local participe do processo de decisão, inserindo-os no âmbito da educação ambiental e sanitária. A bacia hidrográfica é também um processo descentralizado de conservação e proteção ambiental, sendo um estímulo para a integração da comunidade e a integração institucional (TUNDISI, 2006).

3. Bacias Hidrográficas e Hidrologia

Para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos é fundamental conhecer a dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas, seus regimes de variação de vazões e, principalmente, suas relações com os agentes econômicos e socioambientais presentes na área de contribuição da bacia (SANTOS, 2010)

Assim, em análises hidrológicas, a bacia hidrográfica é necessariamente a unidade de pesquisa e planejamento ambiental, sendo o conhecimento de suas características físicas o primeiro passo nos estudos de gerenciamento dos recursos hídricos (TUNDISI, 2006; SANTOS, 2010). O uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas interferem decisivamente no regime hidrológico, ocasionando variações expressivas tanto em termos de vazões máximas como de vazões mínimas, além dos arrastes de sedimentos (UZEIKA, 2009; SANTOS, 2010; FOLETO, 2018).

Ainda segundo Tundisi (2006), a bacia hidrográfica é uma forma racional de organização do banco de dados, induzindo assim alternativas para os usos de seus mananciais e seus recursos.

A lei federal 9.433, de 8 de janeiro de 1977, define a bacia hidrográfica como sendo a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. A política estadual de recursos hídricos da Bahia, sendo alinhada a lei federal, define a bacia hidrográfica como sendo a unidade territorial definida para planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, devendo ser articulada com a política de Territórios de Identidade.

Baseado nas políticas ambientais, os comitês de bacias possuem um papel fundamental, pois são órgãos colegiados com representantes das instancias municipal, estadual e federal, usuários da água e sociedade civil. É por meio de discussões e negociações democráticas, que esses comitês avaliam os reais e diferentes interesses sobre os usos das águas das bacias hidrográficas (ANA, [entre 2010 e 2020]).

Dessa forma as entidades civis e publicas necessitam de informações atuais e com bom nível de precisão para gerir os recursos hídricos. Diante disso, Alves (2018) destaca que estudos técnicos devem ser realizados de forma cuidadosa e bem fundamentados, levando em consideração aspectos como clima, relevo, rede de drenagem, tipo e cobertura do solo.

4. Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe

As reservas de Mata Atlântica concentradas no Sul da Bahia são as maiores do nordeste brasileiro (SARMENTO-SOARES *et al.*, 2007). De acordo com Cordeiro (2003), os extensos Parques do extremo sul, são em conjunto, uma das regiões de Mata de Tabuleiro mais importantes no cenário geral da conservação dos recursos naturais do sul da Bahia e conseqüentemente de toda a Mata Atlântica. Sarmiento-Soares *et al.* (2007) e Carvalho *et al.* (2015), corroboram, destacando que o Extremo Sul, correspondente a uma região de grande importância quanto à biodiversidade e hidrologia local.

A bacia do rio Peruípe está situada no Extremo Sul da Bahia, integrando os municípios de Caravelas, Nova Viçosa, Ibirapuã, Lajedão, Teixeira de Freitas e parte do município de Mucuri. Encontra-se compreendida entre os paralelos 17°30' e 18°00' de latitude Sul e entre os meridianos 39°00' e 40°30' longitude Oeste (SANTOS, *et al.*, 2004).

A área drenada pela bacia hidrográfica do Rio Peruípe conta com a Área de Proteção Ambiental (APA) de Ponta da Baleia/Abrolhos, localizada no terço inferior da bacia próximo ao delta. O delta do Rio Caravelas mantém ainda um nível relativamente alto de preservação, com uma extensa área de manguezais. No trecho médio as áreas se encontram relativamente degradadas, ou ocupadas por plantações de eucalipto, mas é possível encontrar matas ciliares em vários trechos do rio (SARMENTO-SOARES *et al.*, 2007)

Santos (2004) destaca que a ocupação da região se deu inicialmente na faixa litorânea através dos municípios de Nova Viçosa e Caravelas. Com a implantação do porto de Caravelas, servindo como ponto estratégico dos bandeirantes para exploração do interior. O autor continua afirmando que a economia se baseava principalmente na pecuária, pouco desenvolvida, mas mostrava-se promissora na região e na indústria de madeiras. Em aproximadamente 2004, Teixeira de Freitas, em razão da agropecuária e do cultivo do eucalipto, e Nova Viçosa, devido ao turismo e agricultura, esteve entre os municípios mais desenvolvidos da região.

A região tem como principais atividades a pecuária, a agricultura de pequeno porte e o cultivo do eucalipto para obtenção de celulose, (LEÃO *et al.*, 2007), sendo este último, motivo de conflitos sociais e ambientais na localidade (IMA, 2008), principalmente com relação a interferências no ciclo hidrológico, como destacado por Araújo (2019), no estudo de regime de vazões da bacia do rio Peruípe.

5. Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é definido como o fenômeno global de dinâmica fechada da água entre a superfície da terra e a atmosfera, regido fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e a rotação da terra (UZEIKA, 2009; TUNDISI, 2006; TUCCI, 2002).

Tucci (2002) destaca que o intercâmbio da dinâmica entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorrem em dois sentidos. O primeiro na ordem superfície atmosfera, onde o fluxo de água ocorre fundamentalmente na forma de vapor, resultado dos fenômenos de evaporação e transpiração. O segundo ocorre no sentido atmosfera-superfície, onde liberação da água ocorre em qualquer estado físico, sendo mais recorrentes mundialmente as precipitações e as neves.

Complementando a ideia anterior, Tundisi (2006) e Uzeika (2009) relatam que esse ciclo se compõe de precipitação, evaporação, transpiração, infiltração, percolação e drenagem. De acordo com Tundisi (2006), a velocidade de deslocamento e transformação de cada um dos componentes desse ciclo variou nas diferentes eras geológicas. Além disso, a distribuição da água no planeta não é homogênea.

A energia provinda do Sol compõe parte imprescindível no ciclo hidrológico, sendo fundamental para a dinâmica da atmosfera e dos oceanos (ARAÚJO, 2016), pois é aproveitada devido ao efeito estufa natural produzido pelo vapor de água e o CO₂, impedindo que a energia presente entre a superfície terrestre e atmosfera se perca totalmente para fora do sistema, energia essa emitida pelo Sol (TUCCI, 2002). Wang e Dickinson (2012) destacam que três quintos da radiação solar anual disponível, globalmente recebido na superfície do planeta, é utilizada para evapotranspiração.

Tundisi e Tundisi (2015) trazem à tona que as atividades humanas na paisagem, na cobertura vegetal, nos usos do solo, produzindo erosão, sedimentação dos corpos de água, contaminação e poluição em grandes escalas, estão afetando os recursos hídricos. Essas atividades humanas contribuem, juntamente com fenômenos naturais, para o descompasso dos ciclos hidrológicos. Uzeika *et al.* (2012) descreve que uma das formas de planejamento nas práticas de conservação do solo e da água, afim que reduza os prejuízos mencionados anteriormente, é a utilização de modelos matemáticos. Brighenti *et al.* (2017) reitera que a utilização da modelagem hidrológica tem sido uma prática muito comum adotada pelos hidrólogos para solucionar os problemas de grande

complexidade ocorridos no ciclo hidrológico de determinadas bacias, além disso, aplicação dessa ferramenta tende a facilitar a compreensão desses fenômenos.

6. Modelagem Hidrológica

Os modelos hidrológicos são construídos a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos utilizando-se das equações da conservação da massa e da equação da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada (SANTOS, 2009). Esses modelos, com embasamento físico, são de grande valia para interpretação e análise de problemas localizados ou situações com dados topográficos e de parâmetros hidráulicos confiáveis (TUNDISI, 2006; SANTOS, 2009). De acordo Todini *et al.* (2007), os modelos hidrológicos servem a muitos propósitos, sendo uma das aplicações mais importantes a previsão de inundações.

O desenvolvimento de modelos hidrológicos espacialmente distribuídos levou a melhorias na previsão dos fenômenos hidrológicos, isso porque a aplicação dessa ferramenta tende a facilitar a compreensão desses fenômenos (PULLAR e SPRINGER, 2000; BRIGHENTI *et al.*, 2017) ao custo de exigir informações espaciais mais detalhadas. A incorporação de modelos de captação em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) aperfeiçoou a ferramenta, simplificando a entrada de dados e fornecendo melhor interpretação das saídas do modelo (PULLAR & SPRINGER, 2000).

De acordo com Tucci (2010), modelos hidrológicos procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão de determinada seção de um rio. O conhecimento foi a princípio fragmentado pela análise de cada um dos processos, como a avaliação da precipitação, interceptação vegetal, evapotranspiração, infiltração e percolação, balanço de água nas camadas superior e inferior do solo e escoamentos superficial, sub-superficial, subterrâneo e em rios, canais e lago. Blainski *et al.* (2011), acrescentam que os modelos hidrológicos podem ser definidos como representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície ou subsuperfície terrestre, o que permite simular processos físicos em sua dimensão temporal e espacial.

Assim, na avaliação do comportamento hidrológico tornou-se comum o desenvolvimento e aplicação de modelos fisicamente baseados com auxílio de técnicas

de mapeamento, originando e combinando modelos diversos e robustos (VIOLA *et al.*, 2009), variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação (PEREIRA, 2013), desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos cujo objetivo é prever alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas ou mudanças de cenários da cobertura do solo.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados por diferentes aspectos, podendo ser através dos tipos de variáveis utilizadas no modelo (estocástico ou determinístico), tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual), a forma de representar os dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos) (LUCAS *et al.*, 2009; PEREIRA, 2013). Rennó & Soarres (2000) acrescentam que a escolha de um determinado tipo de modelo deve ser feita com base na aplicação que se deseja e na disponibilidade de dados básicos.

Moriasi *et al.* (2015) destaca sete modelos de representação de bacias hidrográficas, sendo a princípio para análise dos parâmetros estatísticos e desempenho dos modelos hidrológicos, retirados de uma coleção especial de nove artigos revisados pelos mesmos, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Modelos hidrológicos

| Modelo | Processos Simulados | Referência |
|----------------|---|------------------------|
| BASINS/HSPF | Hidrologia, degelo, carga de poluentes, erosão. | Duda et al. (2012) |
| KINEROS2/AGWA | Escoamento, erosão, sedimentos. | Goodrich et al (2012) |
| MIKE SHE | Dinâmica da água superficial e subsuperficial, interceptação, evapotranspiração, qualidade da água superficial e subterrânea. | Jaber e Shukla (2012) |
| SWAT | Hidrologia, crescimento de plantas, sedimentos, nutrientes, pesticidas. | Arnold et al. (2012) |
| WAM | Hidrologia, sedimentos, nutrientes. | Bottcher et al. (2012) |
| WARMF | Hidrologia, sedimentos, nutrientes, carbono. | Herr e Chen (2012) |
| WEPP Watershad | Hidrologia, erosão do solo. | Flanagan et al. (2012) |

Fonte: adaptado de Moriasi *et al.* (2015)

Neitsch *et al.* (2009) apontam como vantagem do modelo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) a possibilidade de quantificação dos impactos das mudanças nas práticas de gestão, clima, vegetação, dentre outras, na qualidade da água ou em outras variáveis de interesse na bacia hidrográfica.

Diferentemente, por exemplo, do KINEROS, que modela escoamento superficial e disposição de sedimentos, em eventos únicos (FERRIGO, 2014), o SWAT é um modelo hidrológico de tempo contínuo, ou seja, um modelo de produção em longo prazo. Não se trata de um modelo desenvolvido para simular detalhadamente eventos únicos (NEITSCH *et al.*, 2009; ARNOLD *et al.*, 2012). Foi desenvolvido para estimar o impacto que as práticas de gestão do solo causam nos recursos hídricos (NEITSCH *et al.*, 2009; ARNOLD *et al.*, 2012) na produção de sedimentos e aplicação de produtos químicos nas plantações localizadas nas unidades hidrológicas, com diferentes tipos de solos, usos diversificados do terreno e distintas condições de gestão (NEITSCH *et al.*,

2009), caracterizando o potencial de se trabalhar com o conceito de sub-bacias e HRU's, diferente de outros modelos, como o MIKESHE, onde é utilizado o conceito de células dimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

O modelo foi criado nos Estados Unidos da America (EUA), sendo desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold, do serviço de Pesquisa agrícola (ARS). Neitsch et al (2009) traz que o SWAT é uma continuação de 30 anos de modelagem de fontes não pontuais. Várias agencias governamentais estrangeiras contribuem para a realização deste modelo, como a Universidade A&M do Texas, diversas agências federais, incluindo a agência de proteção ambiental dos EUA. De acordo com Uzeika *et al.* (2012) o modelo tem sido amplamente utilizado com resultados satisfatórios, em vários lugares do mundo, com destaque dos EUA, onde o modelo nasceu, avaliando os efeitos na hidrologia do uso da terra e do manejo do solo, qualidade da água e produção de sedimentos.

No Brasil o SWAT teve um grande avanço para uso em diversas bacias hidrográficas tendo sido utilizado para avaliar os efeitos de diferentes cenários de uso e manejo do solo na hidrologia e na produção de sedimentos (UZEIKA *et al.* 2012). Bressiani *et al.* (2015) destacam mais de 100 estudos com o SWAT em sua revisão, publicados entre 1999 e 2015 em periódicos nacionais e internacionais, anais de conferências e como teses ou dissertações. A maioria desses estudos foi realizada em bacias hidrográficas localizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (67%) e foi conduzida no contexto de pesquisas acadêmicas e cerca de 50% desses trabalhos obtiveram resultados de respostas hidrológicas.

Bressiani *et al.* (2015) ainda apontam que um obstáculo para maiores aplicações do modelo no Brasil é a falta de acesso a dados consistentes que melhorem seu funcionamento.

Estudos no nordeste do Brasil, mais especificamente no sudoeste da Bahia com o modelo SWAT foi realizado por Amorim (2016), estimando a produção de água para bacia hidrográfica do rio catolé grande, utilizando assim calibração manual do modelo. Na mesma bacia, dois anos depois, Alves (2018) utilizou o modelo pra avaliar a implantação de um reservatório de regularização, utilizando o SWAT-CUP para calibração automática do modelo.

7. Soil and Water assessment Tool (SWAT)

O modelo SWAT permite que diferentes processos físicos sejam simulados em bacias hidrográficas. O modelo possui a vantagem de dividir a bacia hidrográfica em várias sub-bacias e posteriormente subdivididas em Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUS) (NEITSCH *et al.*, 2009; ARNOLD *et al.*, 2012), uma vez que esse fator reduz o erro do modelo representar toda a área com mesmo uso, tipo de solo e declividade. Com sub-bacias é permitido ao usuário consultar quaisquer áreas, podendo por tanto manipular a propriedades variantes.

Segundo Neitsch *et al.*, (2009), as informações para cada sub-bacia estão agrupadas nos dados climáticos (precipitação, umidade, temperatura e radiação solar), nas HRUs, águas subterrâneas e canal de drenagem da sub-bacia. É necessário destacar que as HRUs são áreas dentro da sub-bacia que são formadas por um único uso da terra, tipo de solo e relevo (UZEIKA, 2009).

Dentre os dados de entrada para alimentação do modelo, têm-se os dados climáticos: precipitação diária; temperatura máxima e mínima do ar; radiação solar; velocidade do vento; e umidade relativa. Segundo Neitsch *et al.* (2009) esses dados podem ser introduzidos no modelo durante a montagem do projeto ou serem gerados durante a simulação.

Outros dados de entrada do modelo são: topografia, uso e cobertura do solo e classes do solo. As combinações dessas variáveis e suas respostas hidrológicas, respectivamente, nortearão a um diagnóstico mais preciso da movimentação dos pesticidas, sedimentos ou nutrientes na bacia hidrográfica. Segundo Neitsch *et al.* (2009) a simulação dos processos hidrológicos na bacia é composta de duas fases. A primeira é a do terreno do ciclo hidrológico, que corresponde o controle da quantidade de água, sedimento, nutrientes e descarga de pesticida no canal principal de cada sub-bacia analisada. A segunda fase compreende o “itinerário” do ciclo hidrológico, ou seja, o movimento dessas variáveis pela rede de canais da bacia hidrográfica até sua descarga.

É válido ressaltar que o SWAT é composto por equações que representam de forma simplificada a dinâmica da água, sedimentos e nutrientes na bacia (BLAINSKI *et al.*, 2017), devendo-se destaque a equação do balanço hídrico, o qual contabiliza a quantidade final de água no solo. Essa equação obedece ao princípio da conservação da massa ou princípio da continuidade, sendo que a diferença entre as saídas e as entradas é igual a variação de armazenamento dentro do sistema (FEITOSA *et al.*, 2008).

8. Balanço Hídrico

O balanço hídrico ou equilíbrio hídrico é representado no modelo SWAT da seguinte forma:

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

Em que SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_0 é a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm), t é o tempo (dias), Q_{surf} é a quantidade de escoamento superficial no dia i (mm), Ea é a evapotranspiração no dia i (mm), Q_{gw} é a quantidade de fluxo de retorno no dia i (mm), W_{seep} é quantidade de água que entra na zona vadosa no dia i (mm) e R_{day} é a quantidade de precipitação no dia i (mm), (NEITSCH *et al.*, 2009).

Segundo Neitsch *et al.* (2009), para qualquer problema estudado com o modelo SWAT, o equilíbrio hídrico é a força motora por trás dos processos que acontece na Bacia hidrográfica. Nesse sentido, para diagnosticar precisamente a movimentação dos pesticidas, sedimentos ou nutrientes, o ciclo hidrológico, conforme simulado pelo modelo, deverá estar de acordo com o que está acontecendo na bacia hidrográfica, assumindo os erros embutidos no modelo.

8.1 Escoamento Superficial

Quando a precipitação cai no solo seco em forma de água, normalmente a taxa de infiltração tende ser muito alta, diminuindo com o passo que o solo aumenta sua umidade. Ocorrendo a situação que a intensidade da precipitação supera a taxa de infiltração, preenchendo as depressões do solo, e continuando esta superior, o escoamento superficial irá ocorrer (NEITSCH *et al.*, 2009). Alguns dos efeitos desse fenômeno é o transporte de sedimentos e de poluentes em bacias hidrográficas (UZEIKA, 2009).

De acordo com Neitsch *et al.* (2009), o SWAT simula o volume do escoamento superficial e as taxas máximas de escoamento superficial para cada HRU. No modelo o escoamento superficial pode ser computado utilizando o método da curva número do

Serviço de Conservação do Solo (SCS), ou o método de infiltração de Green & Ampt Mein Larson (1973).

8.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo que representa a água perdida para atmosfera, a partir da superfície terrestre, através da transpiração das superfícies das plantas e da evaporação do solo (UZEIKA, 2009). Tucci (2002) afirma que esse fenômeno é muito importante para o balanço hídrico de uma bacia em sua totalidade, principalmente para o balanço hídrico agrícola, norteando o volume de água requisitado.

Segundo Neitsch *et al.* (2009), a evapotranspiração inclui a evaporação dos rios e açudes, solo sem cobertura vegetal e superfícies vegetadas. Inclui também a evaporação que ocorre de dentro das folhas, denominado transpiração, além de áreas com sublimação de gelo e neve.

O modelo SWAT trabalha com a evaporação potencial. Evaporação potencial é a taxa em que a evapotranspiração ocorreria em uma área completa e uniformemente coberta por vegetação e que tenha acesso ilimitado a água no solo (NEITSCH *et al.* 2009), ou seja, uma situação de transferência de água ideal, não levando em consideração as condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo. No modelo SWAT estão disponíveis três formas de estimar a evapotranspiração potencial, são eles: o método Hargreaves, o método de Priestley-Taylor e o método de Penman-Monteith.

O método apresentado por Penman em 1948 e modificado por Monteith em 1965 (AMORIM, 2016), combina alguns parâmetros responsáveis pela energia necessária para a evaporação: albedo; resistência superficial para solo saturado; índice de área foliar; crescimento efetivo da vegetação e profundidade da raiz (MACHADO *et al.*, 2017). Silva *et al.* (2018) afirma que o método Penman-Monteith é considerado, internacionalmente, o mais apropriado, pois ele procura representar, de forma coerente, o fenômeno biofísico da evapotranspiração, além disso, é alimentado por quase todos os elementos meteorológicos observados em estações meteorológicas de superfície.

A equação de Penman-Monteith é a seguinte:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta.(H_{net} - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot U_2 [e_z^0 - e_z]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34U_2)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}), Δ é a relação da declividade da curva da pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, H_{net} é a radiação em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, G é a densidade do fluxo de calor para o solo em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, e_z^0 é a pressão do vapor na saturação na altura z em kPa, e_z é a pressão de vapor de água na altura z em kPa, γ é a constante psicométrica em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Alguns estudos com o SWAT utilizando o método de Penman-Monteith podem ser destacados, como Bressiane (2016) no estudo de risco hidrológico com diferentes métodos de calibração, Arroio Junior (2016) no estudo do aprimoramento das rotinas e parâmetros dos processos hidrológicos e Me *et al.* (2015) no estudo dos efeitos das condições hidrológicas no desempenho do modelo e na sensibilidade dos parâmetros para uma bacia na Nova Zelândia.

É importante destacar que o modelo de Penman-Monteith é considerado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) o método padrão, para estimar evapotranspiração.

8.3 Escoamento subterrâneo

De acordo com Neitsch *et al.* (2009), um aquífero é uma unidade geológica que pode armazenar água suficiente para movimentá-la em uma velocidade elevada, tornando-a hidrológicamente significativa. A movimentação da água subterrânea é de responsabilidade da taxa de percolação da mesma através do perfil do solo. O fluxo, para abastecimento dos aquíferos, ocorre quando a umidade de uma camada do solo ultrapassa a sua capacidade de campo, dessa forma, o excesso da água na capacidade de campo fica disponível para percolação e escoamento lateral.

No modelo SWAT a percolação é calculada em cada camada do perfil do solo, podendo haver percolação somente quando houver condição de excesso da umidade na capacidade de campo, sendo calculado segundo a Equação 3. Para cada sub-bacia, o modelo SWAT simula dois aquíferos, aquífero raso e aquífero profundo. O aquífero raso é um aquífero não confinado, que contribui para o fluxo o canal principal ou para a extensão da sub-bacia. O balanço do equilíbrio hídrico para o aquífero raso está descrito na Equação 4.

$$SW_{ly.excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde $SW_{ly.excess}$ é o volume de água drenável na camada saturada de solo (mm), SW_{ly} é a umidade da camada do solo em determinado dia (mm), FC_{ly} é a capacidade de campo de determinada camada do solo (mm). É importante ressaltar que se a umidade da camada do solo for menor ou igual a capacidade de campo o volume de água drenável será igual a zero.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchr,sh} - Q_{gw} - W_{revap} - W_{pump,sh} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm), $aq_{sh,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm), $W_{rchr,sh}$ é a quantidade de água que reabastece o aquífero no dia i (mm), Q_{gw} é o fluxo de base que abastece o canal no dia i (mm), W_{revap} é a quantidade de água que retorna à zona de raízes em resposta às deficiências hídricas no dia i (mm) e $W_{pump,sh}$ é a quantidade de água retirada do aquífero por bombeamento no dia (mm).

O tempo entre o momento na qual a água sai do perfil do solo e entra no aquífero raso ou profundo dependerá da lâmina d'água e das propriedades hidráulicas das formações geológicas nas zonas de aeração (NEITSCH *et al.* 2009), discriminando assim a dinâmica de recarga desses aquíferos. A recarga do aquífero raso e o profundo são dados pela seguinte equação:

$$W_{rchr,i} = \left[1 - \exp\left(\frac{-1}{\delta gw}\right) \right] \cdot W_{seep} + \exp\left(\frac{-1}{\delta gw}\right) \cdot W_{rchr,i-1} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde $W_{rchr,i}$ é a quantidade de água que penetra no aquífero no dia i (mm), δgw é o tempo de atraso ou de drenagem das formações geológicas em dias, W_{seep} é a quantidade de água que sai da base do perfil solo no dia i (mm) e $W_{rchr,i-1}$ é a quantidade de água que penetra no aquífero no dia $i-1$ (mm).

A água que penetra no aquífero profundo supostamente contribui com o fluxo da água fora da bacia hidrográfica em questão (NEITSCH *et al.* 2009). Com base nessa afirmação, é necessário reconhecer que uma fração da recarga total diária é drenada para

o aquífero profundo, e dessa forma é necessário computar esse volume que resta para o aquífero raso, podendo ser descrito através da equação:

$$W_{deep} = \beta_{deep} \cdot W_{rchrq} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde W_{deep} , corresponde a quantidade de água que se desloca para o aquífero profundo no dia i (mm), β_{deep} é o coeficiente de percolação do aquífero (adimensional), W_{rchrq} é a quantidade de recarga entrando em ambos os aquíferos no dia i (mm). A quantidade de recarga do aquífero pode ser calculada através da equação:

$$W_{rchrq,sh} = W_{rchrq} - W_{deep} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde $W_{rchrq,sh}$ é a quantidade de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm)

Frente à importância do aquífero raso em contribuir com o fluxo de base do canal principal, este poderá entrar na extensão somente se a quantidade de água for armazenada no mesmo exceder um valor limite especificado pelo usuário. No Software, esse limite é ajustado através do parâmetro GWQMN ($q_{shthr,q}$), sendo representado na equação de fluxo de água subterrânea para o canal principal, Equação 16.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta T) + w_{rchrq,sh} \cdot [1 - \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta T)] \quad (\text{Equação 8})$$

$$\text{Se } aq_{sh,i} > q_{shthr,q}$$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad (\text{Equação 9})$$

$$\text{Se } aq_{sh,i} \leq q_{shthr,q}$$

Onde $Q_{gw,i}$ é o fluxo de água subterrânea para o canal no dia i (mm), $Q_{gw,i-1}$ é o fluxo de água subterrânea para o canal no dia $i-1$ (mm), α_{gw} é a constante da recessão do escoamento de base (adimensional), ΔT é o intervalo de tempo (dias), $w_{rchrq,sh}$ é a quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia i (mm), $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm), $q_{shthr,q}$ é o limite admitido pelo usuário do nível de água no aquífero raso para que possa ocorrer o fluxo de base (mm).

8.4 Escoamento Lateral

O escoamento lateral possui grande importância em áreas com solos que possuem alta condutividade hidráulica nas camadas da superfície e uma camada impermeável ou semipermeável não muito profundos (NEITSCH *et al.* 2009). Durante a precipitação a água escoará verticalmente até encontrar a camada impermeável subsolo, se acumulando e formando uma zona saturada, sendo o escoamento lateral originado dessa zona (VEIGA, 2014).

O escoamento lateral está representado no balanço hídrico no componente subterrâneo, ou seja, é a água que escoar da zona vadosa, em função do processo de redistribuição da água no perfil do solo, até o canal. Tucci (2002) descreve que em aquíferos livres, ou não confinados, a água é retirada do armazenamento por drenagem de poros, expansão da água e compactação da rocha, sendo a primeira contribuição mais expressiva, frente a duas últimas.

O modelo SWAT computa o escoamento lateral assumindo um modelo de armazenamento cinemático para o escoamento no subsolo resumido por Sloan e Moore em 1984 (NEITSCH *et al.* 2009). Esse modelo simula o escoamento lateral, considerando um corte transversal bidimensional ao longo da trajetória preferencial de drenagem até encontrar uma inclinação.

O escoamento lateral é calculado utilizando a equação 10.

$$Q_{lat} = 0,024 \frac{(2SWly.excess \cdot Ksat.slp)}{\phi_d \cdot L_{hill}} \quad \text{(Equação 10)}$$

Onde Q_{lat} é o escoamento lateral em um dado dia (mm d^{-1}), $SWly.excess$ é o excesso de água armazenada na camada saturada do solo em (mm), $Ksat.slp$ é a condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}), slp é a declividade da sub-bacia (m m^{-1}), ϕ_d é a porosidade do solo (mm mm^{-1}) e L_{hill} é o comprimento da rampa.

9. Análise de Sensibilidade do Modelo

Os parâmetros mais relevantes do modelo para um critério de desempenho podem ser mais precisamente derivados usando análises de sensibilidade (GUSE, *et al.*, 2017). O SWAT-CUP, programa desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007), é um

programa independente que foi desenvolvido para análises de incertezas e sensibilidade, processos de calibração e validação, a partir de simulações com o SWAT. Nesse software, utilizando-se um algoritmo de amostragem, nesse caso o SUFI2, é sabido que o mesmo avalia a sensibilidade dos parâmetros através de um sistema de regressão múltipla e pelo método de amostragem aleatória Hipercubo Latino (ABBASPOUR, 2015; KHALID *et al.*, 2016; BRIGHENTI *et al.*, 2017; MOREIRA *et al.*, 2018). Dois coeficientes são indicados para avaliação da análise de sensibilidade, o teste de hipótese *p-value* (teste de distribuição de Student) e o índice *t-test*, sendo auxiliares na tomada de decisão para a definição dos parâmetros sensíveis.

De acordo com Arnold *et al.* (2012) e Brighenti *et al.* (2017), nesta fase, os coeficientes do algoritmo podem ser usados para eliminar parâmetros não sensíveis do processo de calibração, definindo melhor o ranking de parâmetros utilizados. Brighenti *et al.* (2015) descrevem que o índice estatístico *t* é obtido pela relação do coeficiente do parâmetro encontrado na análise de regressão múltipla pelo erro padrão. Assim, se o coeficiente for diferente em relação ao erro padrão, logo seu valor será diferente de zero, o que significa sensibilidade no parâmetro.

A utilização desse índice implica na indicação de um limite de corte para a definição de parâmetros mais sensíveis. Assim, o valor *p*, originado de um teste de hipótese, onde a hipótese nula condiciona os resultados a uma distribuição aleatória e a hipótese não nula condiciona os resultados ao parâmetro testado. Por exemplo, um valor *P* baixo (<0,05) indica que se pode rejeitar a hipótese nula, ou seja, há apenas 5% de chance que os resultados teriam surgido de uma distribuição aleatória (BRIGHENTI *et al.*, 2017).

Porém, na montagem da estrutura de análise de sensibilidade no SWAT-CUP é necessário estabelecer os valores mínimos e máximos que cada parâmetro, e posteriormente realizar sucessivas iterações (ALVES, 2018). Três métodos são utilizados para definir a alteração dos parâmetros dentro dos limites pré-estabelecidos, sendo a substituição direta (o modelo altera o valor diretamente), adição (em que um valor constante é adicionado ao valor inicial) e multiplicação (a alteração é feita variando o valor inicial por porcentagem) (BRESSIANE, 2015; VERVOORT, 2017). Para o processo de análise de sensibilidade utilizando o SWAT a nomeação dos parâmetros pode ser resumida mais brevemente no Quadro 1:

Quadro 1: Métodos para alteração dos parâmetros

| Prefixo | Definição |
|---------|---|
| v_ | "Valor" ou substituição direta significa que o valor do parâmetro existente será substituído pelo valor fornecido |
| a_ | "Adição" significa que o valor fornecido será adicionado aos valores de parâmetros existentes |
| r_ | "Relação" significa que o parâmetro existente é multiplicado por (1 + valor fornecido) |

Fonte: Vervoort (2017)

Quando o usuário decide sobre os intervalos de parâmetros, é importante considerar se o intervalo realmente faz sentido para o parâmetro (ARNOLD *et al.*, 2012) ou seja, o conhecimento de hidrologia deve ser levado em consideração na escolha dos parâmetros. De acordo com Vervoort (2017) alguns parâmetros não podem ser negativos e outros não podem ser zero. O usuário deve tomar decisões enquanto a escolha dos parâmetros, pois no SWAT-CUP, isso não é totalmente automatizado. O usuário pode aplicar sua compreensão hidrológica à bacia hidrográfica e usá-la para verificação da autenticidade dos parâmetros escolhidos e seus intervalos. Vervoort (2017) recomenda que para começar esse planejamento, é conveniente tomar uma grande variedade de parâmetros que estão ligados aos quatro grupos principais: Solo, Água Subterrânea, Fluxo Terrestre e Subterrâneo.

10. Calibração e Validação do Modelo

De acordo com Araujo (2016), o período de dados observados, destinado à fase de calibração, deve ser de pelo menos três anos. Deve ser também separado um período inicial de aquecimento, que não é considerado no ajuste dos parâmetros e assim, para ele, não há a necessidade de ter vazões observadas. No modelo SWAT, esse período de aquecimento é recomendado de dois a três anos.

Na fase de calibração, os parâmetros são melhorados, ou encontrados a melhores faixas de valores para os parâmetros selecionados, manualmente ou automaticamente (ARNOLD *et al.*, 2012; BRIGHENTI *et al.*, 2017), sendo essa fase considerada um desafio (PEREIRA, 2013), pela dificuldade de se alcançar os melhores valores. Concomitantemente avalia-se a sensibilidade do modelo à variação dos parâmetros. Por

fim, na validação, o modelo é avaliado em seu desempenho com os parâmetros já calibrados em período distinto da série de dados observados (SILVA e CHRISTOFARO, 2016; BRIGHENTI *et al.*, 2017), estimando-se as incertezas do modelo em simulações chuva-vazão (ARNOLD *et al.*, 2012; ARAUJO, 2016).

No SWAT são oferecidas diversas formas de representação gráfica dos resultados, inclusive para representar a incerteza que os parâmetros produzem nos resultados e também estatísticas como média e desvio padrão dos dados observados e resultados, inclinação, interseção, coeficientes de correlação e de determinação da regressão e eficiência de Nash e Suttcliffe, que são apresentadas para os períodos de calibração e de validação (ARAUJO, 2016).

10.1 Análise de incerteza

O grau de confiabilidade de um modelo hidrológico pode ser investigado por meio das técnicas de análise de incertezas e de sensibilidade, permitindo quantificar e representar um intervalo possível de valores de parâmetros que caracterizam o fenômeno modelado e os potenciais modelos que representam o evento hidrológico estudado (SARMENTO e KOIDE, 2011).

As incertezas presentes nos dados de entrada, nos parâmetros e na estrutura do modelo conferem aos resultados da modelagem limites de adoção, ou seja, intervalos de confiança, que devem ser avaliados pelo modelador (CABRAL *et al.*, 2017). É evidente a necessidade de se avaliar essas incertezas, pois mesmo após a calibração, há potencialmente uma grande incerteza nos resultados, que surgem simplesmente porque é muito improvável encontrar dados observados sem erros, além disso, nenhum modelo representa inteiramente a realidade hidrológica (MULETA *et al.*, 2004; SARMENTO e KOIDE, 2011; CABRAL *et al.*, 2017).

O SWAT-CUP contém cinco procedimentos de calibração, onze funções objetivas e inclui aplicações como a visualização da área de estudo usando o Bing Map (ANDRADE *et al.*, 2017). Os procedimentos de calibração são os algoritmos *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* – GLUE, *Parameter Solution* – ParaSol, *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm* - SUFI2, *Markov Chain Monte Carlo* – MCMC e *Particle Swarm Optimization* – PSO.

O SUFI2 é um dos cinco algoritmos disponibilizados nesse pacote (SWAT-CUP), cuja finalidade é realizar análise de sensibilidade, calibração multi-paramétrica (multi-critério) e análise de incerteza (ROCHA, 2013). O mesmo é capaz de analisar simultaneamente um grande número de parâmetros que norteiam os processos do SWAT, buscando-se o melhor resultado final através de inúmeros arranjos dos parâmetros, variando-se dentro do intervalo permitido pelo modelo SWAT, e ainda, combinando todos os parâmetros entre si.

Dessa forma, o algoritmo SUFI2 realiza o mapeamento de todas as incertezas, pois nele as incertezas nos parâmetros são responsáveis por todas as fontes de incerteza dos processos hidrológicos e hidrossedimentológicos. A propagação das incertezas nos parâmetros leva a incertezas nas variáveis de saída do modelo, que são expressas como as distribuições de probabilidade de 95%, ou seja, variam conforme o procedimento que busca capturar o máximo de dados observados para no interior da banda de incerteza de predição de 95% (95% prediction uncertainty – 95PPU). A incerteza global em que o output é quantificado pela 95PPU é calculada entre os níveis de 2,5% a 97,5% de significância da distribuição acumulativa de uma saída variável obtida pela amostragem do Hipercubo Latino (ROCHA, 2013).

Uma das maneiras de quantificar o ajuste entre dados simulados e observados no SUFI2 é utilizar os índices estatísticos fator P e fator R, sendo o primeiro a percentagem de dados observados delimitados pela banda 95PPU (valor máximo 100%), e o segundo que é a largura média da banda dividida pelo desvio padrão da correspondente variável medida (ABBASPOUR, 2015; BRIGHENTI *et al.*, 2017). Assim, um fator P igual a 100% e um fator R igual a zero é uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos.

Abbaspour (2015) recomenda o fator $P \geq 70\%$ para a descarga, enquanto o fator $R \leq 1,5$. Para o sedimento, um fator P menor e um fator R maior podem ser aceitáveis. Dessa forma, não existem números concretos para que esses dois fatores devam adotar, semelhante ao fato de que não existem números concretos para R2 ou NSE.

Vários estudos utilizando o SWAT revelam que possuem diversas maneiras com coeficientes distintitos para avaliar a eficiência do modelo. Sarmiento e Koide (2011) no estudo de Análise de Incerteza em Modelos Hidrológicos utilizaram apenas o coeficiente Nash-Sutcliffe destacando para esse trabalho baixa capacidade do modelo obtido prever fluxo para um período equivalente a um período de calibração. Já no trabalho de Silva *et al.* (2018), quando os mesmos avaliam o desempenho do modelo

SWAT para a estimativa da evapotranspiração potencial para a região de Petrolina, Pernambuco, utilizaram análises de regressão para a obtenção dos coeficientes de determinação (R^2), coeficientes de correlação (r), erro médio porcentual (EMP), erro médio absoluto (EMA) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN), revelando o modelo como adequado para fornecer dados alternativos de evapotranspiração.

Moriasi *et al.* (2015) destacam, baseado em suas experiências em modelagem e análises pessoais dos parâmetros estatísticos, que é sensato a utilização de três deles para descrever processos hidrológicos: coeficiente de Nash e Sutcliff (1970), o percentual de viés entre dados observados e simulados (Pbias) e o coeficiente de determinação (R^2).

O coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variação residual, em comparação com a variação dos dados medidos, ou seja, o ajuste entre dados simulados e observados (MORIASI *et al.*, 2015). O NSE varia entre menos infinito e 1 (valor ótimo). Valores entre 0 e 1 caracterizam os níveis de desempenho do modelo e, valores ≤ 0 , indicam, em teoria, que a média dos dados observados são muito superiores aos dados modelados, na explicação do fenômeno em questão (Andrade *et al.*, 2017). A equação que descreve o NSE está descrita a seguir:

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,m})^2} \right] \quad (\text{Equação 11})$$

Onde n é o número de pares observados e simulados, $Q_{o,i}$ é a vazão observada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), $Q_{s,i}$ é a vazão simulada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), $Q_{o,m}$ é a vazão média observada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Moriasi *et al.* (2015) indicam algumas vantagens de se utilizar o coeficiente NSE, são eles:

- Esse coeficiente é uma medida quantitativa conducente ao desenvolvimento de critérios de avaliação de desempenho correspondentes;
- É um bom coeficiente para uso com simulações contínuas de longo prazo e pode ser usado para determinar quão bem o modelo simula tendências para a resposta de preocupação do produto;

- Se trata de um coeficiente robusto e pode ser usado para avaliar o desempenho do modelo para várias respostas de saída (por exemplo, fluxo de corrente, sedimentos, nutrientes, pesticidas) e escalas temporais; e
- Se trata de um coeficiente comumente usados, o que significa que há informações abrangentes sobre os valores relatados, que podem ser usados para fins de comparação. Além disso, pode incorporar incerteza de medição.

A estatística percentual de viés (PBIAS) mensura a média tendência de os fluxos simulados serem maiores ou menores que os correspondentes observados, o valor ideal é zero, valores positivos indicam um viés do modelo em relação à subestimação, enquanto valores negativos indicam um viés em relação à superestimação (GUPTA *et al.*, 1999; Brighenti *et al.*, 2015; BUENO *et al.*, 2017). Pode-se calcular o valor de Pbias através da equação:

$$Pbias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}} \right] \cdot 100 \quad (\text{Equação 12})$$

De acordo com Rodrigues (2012), o coeficiente de determinação é sugestivo para medir a explicação da reta de regressão. Dessa forma, quanto mais próximo de 1 estiver o valor do coeficiente de determinação, maior a porcentagem da variação de Y explicada pela reta estimada, e conseqüentemente, maior a qualidade do ajustamento. O coeficiente de determinação é igual ao quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. O coeficiente de determinação pode ser calculado com a seguinte equação:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,m})(Q_{s,i} - Q_{s,m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{s,m})^2}} \right]^2 \quad (\text{Equação 13})$$

Onde $Q_{s,m}$ é a vazão média simulada ($m^3 s^{-1}$).

Os critérios de avaliação recomendados por Moriasi *et al* (2015) estão listado na tabela abaixo.

Tabela 2: Critérios de avaliação de modelos hidrológicos

| Variável | Escala Temporal | Muito Bom | Bom | Satisfatório | Insatisfatório |
|----------|-----------------|-----------|---------------------------|---------------------|----------------|
| R^2 | Anual | > 0.75 | $0.70 \leq R^2 \leq 0.75$ | $0.60 < R^2 < 0.70$ | ≤ 0.60 |

| | | | | | |
|--------------|---------|----------------|----------------------------|---------------------------------|-------------|
| | Mensal | > 0.85 | $0.80 \leq R2 \leq 0.85$ | $0.70 < R2 < 0.80$ | ≤ 0.70 |
| | Diário | > 0.85 | $0.70 \leq R2 \leq 0.85$ | $0.50 < R2 < 0.70$ | ≤ 0.50 |
| NSE | Anual | > 0.75 | $0.60 \leq NSE \leq 0.75$ | $0.50 < NSE < 0.60$ | ≤ 0.50 |
| | Mensal | > 0.85 | $0.70 \leq NSE \leq 0.85$ | $0.55 < NSE < 0.70$ | ≤ 0.55 |
| | Diário | > 0.80 | $0.70 \leq NSE \leq 0.80$ | $0.50 < NSE < 0.70$ | ≤ 0.50 |
| PBIAS (%) | Anual | $\leq \pm 2.5$ | $\pm 2.5 < PBIAS < \pm 15$ | $\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 35$ | $> \pm 35$ |
| | Mensal | $\leq \pm 3.0$ | $\pm 3.0 < PBIAS < \pm 10$ | $\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$ | $> \pm 15$ |
| | Sazonal | $\leq \pm 10$ | $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$ | $\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 45$ | $> \pm 45$ |

Fonte: Moriasi *et al.* (2015).

Os critérios de avaliação de modelos hidrológicos estabelecidos por Moriasi *et al.* (2007) e Moriasi *et al.* (2015) são bastante difundidos nos estudos hidrológicos, vários autores aplicam esse critério como padrão. Para estimar a vazão, Silva e Christofaro (2016) calibraram o SWAT para bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, utilizando o coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) e o coeficiente de determinação (R^2) tomando posse dos critérios propostos por Moriasi *et al.* (2007). O mesmo critério, para o coeficiente de Nash-Sutcliffe é citado por Silva (2010) em seu estudo de Análises de Incertezas e Avaliação dos Fatores Influentes no Desempenho de Modelos Hidrológicos. Carvalho (2014) em seu estudo de estimativa de vazões e produção de sedimentos em bacia agrícola do Serrado brasileiro, com o uso do modelo SWAT, também utiliza o critério de avaliação de desempenho proposto por Moriasi *et al.* (2007), Araújo (2016) também cita os mesmos em seu estudo, quando demonstra os testes e análises gráficas para desempenho de modelos hidrológicos, sendo destaque o PBIAS, aqui citado.

11. Obtenção de Dados Climáticos

Como já mencionado aqui nesse trabalho, para alimentação do modelo SWAT são necessários dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. Sendo assim, o modelador poderá optar por utilizar dados observados ou gerar os valores usando dados médios mensais resumidos ao longo de vários anos (NEITSCH *et al.*, 2009). O modelo SWAT inclui o modelo de gerador de clima WXGEN (Sharpley e Williams, 1990) para gerar dados climáticos ou preencher falhas nos dados observados.

De acordo com Neitsch *et al.* (2009) a ocorrência de precipitação provoca impactos na umidade relativa, temperatura e radiação solar do dia, demonstrando a relevância deste no modelo WXGEN, gerando primeiro a precipitação do dia independentemente. Após a quantidade total de chuva para o dia ser gerada, a distribuição da chuva durante o dia é calculada, se o método Green & Ampt for usado para infiltração. E só então são geradas as temperaturas máximas e mínimas, radiação solar e umidade relativa, baseado na presença ou ausência de chuva durante o dia. E por fim, a velocidade do vento é gerada independentemente.

Outra opção para se utilizar dados climáticos diários como requerido pelo modelo SWAT são dados interpolados disponibilizados por Xavier *et al.* (2015), o qual desenvolveu grades de alta resolução ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) de precipitação diária, evapotranspiração e as cinco variáveis climáticas necessárias para entradas no modelo (temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento).

Xavier *et al.* (2015) testaram seis esquemas de interpolação diferentes para criar grades para essas variáveis. Os dados foram obtidos a partir de 3625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas para o período de 1980 a 2013. O método utilizado por esses autores se trata de uma validação cruzada que compara dados observados pontuais, os quais apontam estimativas interpoladas, selecionando o melhor esquema de interpolação para cada variável climática. De acordo com esses autores os métodos de ponderação por distância inversa e distância angular produziram os melhores resultados.

Assim, os resultados e desempenho de cada interpolação foram disponibilizadas por esses em Xavier *et al.* (2015) e os conjuntos de dados em grade (em vários arquivos individuais agrupados por tipo de variável e período) estão disponíveis para download através de um sistema de compartilhamento de arquivos da Universidade do Texas: <https://utexas.box.com/Xavier-et-al-IJOC-DATA>. Para arquivo suplementar e leia-me: <https://utexas.box.com/Xavieretal-IJOC-SUPPLEMENTAL>. No arquivo Suplementar, exclusivamente no “leia-me”, Xavier *et al.* (2015) sugerem a utilização do programa MATLAB para extração desses dados diários, na coordenada desejada. Além disso, esses autores desenvolveram um *Script* no MATLAB para ler e *plotar* esses dados.

12. Referências

ABBASPOUR, K. C., YANG, J., MAXIMOV, I., SIBER, R., BOGNER, K., MIELEITNER, J., ZOBRIST, J., SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water

quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of hydrology**, v. 333, n. 2-4, p. 413-430, 2007.

ABBASPOUR, K. C., 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Disponível: http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf. Acesso: 08 abr. 2020.

ALMEIDA, T. M., MOREAU, A. M. S. S., MOREAU, M. S., PIRES, M. M., FONTES, E. O., GÓES, L. M. Reorganização socioeconômica no extremo sul da Bahia decorrente da introdução da cultura do eucalipto. **Sociedade & Natureza**, v. 20, n. 2, p. 5-18, 2008.

ALVES, L. F. INFLUÊNCIA DE RESERVATÓRIOS DE REGULARIZAÇÃO NO REGIME DE VAZÕES DA BACIA DO RIO CATOLÉ GRANDE. 2018.

ALMEIDA, T. M. **Cultivo de eucalipto no extremo sul da Bahia: modificações no uso da terra e socioeconômicas**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Ilhéus, UESC.

ANDRADE, C. W. L., MONTENEGRO, S. M. G. L., LIMA, J. R. S., MONTENEGRO, A. A. A., SRINIVASAN, R. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da região Nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 440-453, 2017.

ARAÚJO, L. M. N. Identificação de padrões hidrológicos de precipitação e de umidade do solo na bacia hidrográfica do rio Piabanha/RJ. **COPPE/UFRJ-Rio de Janeiro, Brasil**, 2016.

ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, M. J., SRINIVASAN, R., SANTHI, C. Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARAÚJO, K. P. B. INFLUÊNCIA DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PERUÍPE – BA. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Bahia. p. 12. 2019.

BAHIA, [IMA] Instituto do Meio Ambiente. *Silvicultura Do Eucalipto No Sul e Extremo Sul Da Bahia: Situação Atual E Perspectivas Ambientais*. Salvador - BA, p.5. 2008.

BLAINSKI, E., SILVEIRA, F. A., CONCEIÇÃO, G., GARBOSSA, L. H. P., VIANNA, L. F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio

Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. *Agropecuária Catarinense*, v.24, n.1, mar. 2011.

BLAINSKI, E., ACOSTA, E., NOGUEIRA, P. C. P. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 2, p. 226-237, 2017.

BRASIL, [ANA] Agência Nacional das Águas. *Comitês de Bacia Hidrográfica*. [entre 2010 e 2020]. Disponível em: < <https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/comites-de-bacia-hidrografica>>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Lei n. 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p.

BRIGHENTI, T. M., BONUMÁ, N. B., CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo Swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **RBRH**, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.

BRIGHENTI, T. M., BONUMÁ, N. B., CHAFFE, P. L. B., GRISON, F., KOBAYAMA, M. Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: estudo de caso do o modelo SWAT. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico],[Porto Alegre: ABRH, 2017]**, 2017.

BUENO, E. O., OLIVEIRA, V. A., VIOLA, M. R., MELLO, C. R., Desempenho do modelo swat para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica. **Scientia agraria**, v. 18, n. 2, p. 114-125, 2017.

CABRAL, S. L., SAKURAGI, J., SILVEIRA, C. S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 1, p. 57-70, 2017.

CARVALHO, F. H. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. 2014.

CARVALHO, N. B., BEZERRA, L. J., LUZ, E. D. M. N, SANTOS, M. V. O. Ascomictos foliícolas coletados aleatoriamente no dossel de árvores da Mata Atlântica no Sul da Bahia. **Agrotropica**, v. 27, n. 3, p. 239-248, 2015.

CECONI, D. E., PICCILLI, D. G. A., BERNARDI, F., FENSTERSEIFER, P. Análise de vulnerabilidade visando o planejamento ambiental em bacia de captação para abastecimento público. **Ambiente & Sociedade**, v. 21, 2018.

CIRILO, J. A. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, n. 106, p. 45-58, 2015.

CORDEIRO, P. H. C. Padrões de distribuição geográfica da avifauna, com ênfase nas espécies endêmicas e ameaçadas, nos remanescentes de Mata Atlântica no sul da Bahia. **Corredor de biodiversidade da Mata Atlântica do sul da Bahia. CD-ROM. Ilhéus: IESB/CI/CABS/UFMG/UNICAMP**, 2003.

DEUS, F. O., LATUF, M. O. Outorga e suas implicações na piscicultura no entorno do reservatório de Furnas. *Caderno de Geografia*, v.29, Número Especial 2, 2019.

FERREIRA, R. S., UAGODA, R. E. S. Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 03, p. 880-893, 2017.

FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo swat obtidos por calibração automática—estudo de caso da bacia do lago descoberto-DF. 2014.

FOLETO, E. M. O contexto dos instrumentos de gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil. **Geoambiente On-line**, n. 30, 2018.

GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of hydrologic engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

KHALID, K., ALI, M. F., RAHMAN, N. F. A., MISSPAN, M. R., HARON, S. H., OTHMAN, Z., BACHOK, M. F. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. **Procedia engineering**, v. 162, p. 441-447, 2016.

LATUF, M. O. Mudanças no uso do solo e comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros. 2007.

MAEBARA, A. K., BARRETO, D. IX-018—ESTUDO DO POTENCIAL DO APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA NA DEMANDA DE ÁGUA POTÁVEL NA REGIAL SUDESTE.

MOREIRA, L. L., SCHWAMBACK, D. RIGO, D. Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 6, 2018.

MORIASI, D. N., GITAU, M. W., PAI, N., & DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015.

MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

PEREIRA, D. R. Simulação hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Pomba usando o modelo SWAT. **Embrapa Cerrados-Tese/dissertação (ALICE)**, 2013.

RAMOS, A. W. P., LUZ, C. C. S., Neves, S. M. A. S., Freitas, L. E., Neves, L. F. S. Análise da capacidade e conflito de uso da terra na bacia hidrográfica do Córrego da Piraputanga-MT, Brasil. **Caderno de Geografia, Belo Horizonte**, v. 28, n. 55, p. 812-827, 2018.

SANTOS, E. A. Influência do uso do solo no regime hidrológico da bacia do rio Lontra. 2010.

SANTOS, M. S., FRANCO, G. B., LOPES, N. S., PINHEIRO, M. A., MOREAU, A. M. S. S., ANDRADE, A. C. S., MOREAU, M. S. BACIA DO RIO PERUÍPE (EXTREMO SUL DA BAHIA): ASPECTOS FÍSICOS E SÓCIO-ECONÔMICOS. UFSM - RS, 02 a 07 de Agosto de 2004.

SARMENTO-SOARES, L. M. S., MAZZONI, R., PINHEIRO, R. F. M. A fauna de peixes na bacia do Rio Peruípe, extremo Sul da Bahia. **Biota Neotropica**, v. 7, n. 3, p. 291-308, 2007.

SARMENTO, L., KOIDE, S. Análise de Incertezas em modelos hidrológicos. International Water Resources Association. 2011.

SETTI, A. A. Lima, J. E. F. W. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2001.

SILVA, N. D. M., CHRISTOFARO, C. Calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão em sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha. **Revista Geografias**, p. 31-39, 2017.

SILVA, L. R. S. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. 2010.

TUNDISI, J. G., TUNDISI, T. M. As múltiplas dimensões da crise hídrica. **Revista USP**, n. 106, p. 21-30, 2015.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p. 24-35, 2006.

TUCCI, C. E. M. Rhama, 2016. Modelos hidrológicos distribuídos. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/modelos-hidrologicos-distribuidos/>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. 2009.

UZEIKA, T., MERTEN, G. H., Minella, J. P.G., Moro. M. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 557-565, 2012.

VIOLA, M. R., MELLO, C. R., ACERBI JR, F. W., SILVA, A. M. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

VIANA, M. B. O eucalipto e os efeitos ambientais do seu plantio em escala. **Biblioteca da Câmara dos Deputados. Centro de Documentação e Informação Coordenação de Biblioteca, Brasília–DF**, 2004.

WANG, K., DICKINSON, R.E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. **Reviews of Geophysics**, v. 50, n. 2, 2012.

XAVIER, A. C., KING, C. W. SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

Capítulo 2

AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT APLICADO NO ESTUDO DO REGIME DE VAZÕES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PERUÍPE – BA

Patrick dos Santos Silva¹, Danilo Paulúcio da Silva²

Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais - PPGCA, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia- UESB, Campus Universitário Juvino Oliveira, Rodovia BR 415, km 04, 45.700-000 - Itapetinga – BA, Brasil. Telefone: +55 (77) 3261-8631. Site: <http://www.uesb.br/ppgca>. E-mail: ppgca@uesb.edu.br.

Resumo

Estudos em bacias hidrográficas têm sido realizados a fim de melhorar a compreensão dos processos envolvidos no movimento da água na mesma. A modelagem hidrológica tem sido uma alternativa, como ferramenta de avaliação do comportamento hidrológico, para o estudo desses processos, sendo menos custosa em tempo e recursos financeiros. Dentre muitos modelos atualmente disponíveis, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) se destaca por sua eficiência e abrangência sobre os processos físicos de uma bacia hidrográfica, utilizando-se o conceito de sub-bacias e HRU's para a discretização da bacia. Os resultados no modelo SWAT, com o auxílio do SWAT-CUP, contam com análises de sensibilidade, incertezas, procedimentos de calibração e validação para representar de forma satisfatória a bacia hidrográfica. Por fim, o algoritmo utilizado para a realização desses procedimentos foi o SUFI2. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a sensibilidade dos parâmetros, calibrar e validar o modelo em escala de tempo diário, frente às características locais da bacia hidrográfica do rio Peruípe (topografia, clima, tipos de solo, bem como seu uso e ocupação). Para melhor ajuste do modelo foram identificados os parâmetros mais sensíveis, sendo eles: CN2, ESCO, CH_N2, CH_K2 e ALPHA_BF. Para avaliar o desempenho do modelo foram utilizados os coeficientes de determinação (R^2), Nesh Sutclif (NSE) e o Percentual de Viés (PBIAS), além dos fatores R e P. Os resultados para calibração foram de 0.72 para R^2 , 0.71 para NSE e 5.4 para o PBIAS, enquanto os fatores P e R resultaram em 0.86 e 1.58 respectivamente para escala para escala diária. Os resultados para validação foram de 0.63 para R^2 , 0.58 para NSE e 9.9 para o PBIAS, enquanto os fatores P e R resultaram em 0.66 e 1.01 respectivamente. Em relação aos coeficientes estatísticos na calibração, essa pesquisa atendeu aos critérios propostos para NSE, R^2 e Pbias, sendo obtidos maiores abrangências dos dados observados dentro da estatística de precisão (*p-factor*), 95PPU. Com base nos resultados obtidos na calibração da bacia do rio Peruípe, o modelo está apto para simulação de cenários distintos, com a mudança do uso e ocupação do solo, ou até mesmo cenários futuros.

Palavras-chave: Recursos hídricos, modelagem hidrológica, vazões.

1 Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais - PPGCA, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia- UESB.

1 Introdução

A investigação concernente aos sistemas hidrológicos em bacias hidrográficas tem sido amplamente realizada a partir da necessidade de compreensão dos processos que controlam a movimentação hídrica e conseqüentemente os impactos sobre a quantidade e qualidade da mesma (BLAINSKI *et al*, 2017). Os modelos hidrológicos consolidaram-se como ferramentas de representação e quantificação desses processos

com robustez no potencial para simulação de cenários, de alterações do uso do solo e de intervenções antrópicas (CARVALHO, 2014; BLAINSKI *et al.*, 2017) em diferentes escalas espaciais e temporais.

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) apresenta-se como alternativa com grande potencial de uso, pois pode ser aplicado em bacias hidrográficas, às quais se pretende estudar vazões, processos erosivos, perdas de sedimentos e nutrientes de áreas agricultáveis (ABBASPOUR, 2007; PEREIRA, 2013; ANDRADE *et al.*, 2017;) e urbanas, possibilitando também o estudo de arraste de pesticidas. De acordo com Pereira (2013), não menos importante, o modelo SWAT também é capaz de avaliar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, devido a variações no uso e cobertura do solo.

No entanto, o modelo tem sido aplicado em condições de clima, elevação, geologia, pedologia e de vegetação diferentes daquelas em que foi desenvolvido (PEREIRA, 2013), justificando maior atenção sobre as análises de sensibilidade e incerteza na calibração. A avaliação da análise de sensibilidade dos parâmetros é capaz de desempenhar o papel de identificar parâmetros sensíveis, sendo benéfico e permitindo concentrar esforços na calibração dos mesmos (WANG *et al.*, 2013). Além disso, com base nessa análise, o equilíbrio e a robustez do modelo podem ser analisados para futura melhoria e desenvolvimento da escolha dos parâmetros e conseqüentemente melhores calibrações. A análise de sensibilidade dos parâmetros é então realizada alterando os parâmetros e observando as respostas correspondentes nas variáveis de saída (WANG *et al.*, 2013; ALVES, 2018).

Seguido da análise de sensibilidade, o processo de calibração corresponde ao ajuste dos valores dos parâmetros de entrada e as condições iniciais, ou de contorno, dentro de faixas razoáveis de intervalos para que os resultados simulados correspondam aos observados (MORIASI *et al.*, 2015; SILVA & CHRISTOFARO, 2017). A calibração juntamente com o processo de validação consiste em etapas primordiais e necessárias para o ajuste do modelo (SILVA, 2010). A validação por sua vez corresponde a testes em que se verifica o quanto os resultados estimados com o modelo, baseado na aplicação pretendida, aproxima-se dos dados observados (PEREIRA, 2013). Ou seja, na validação avalia-se a habilidade do modelo na previsão de dados, temporalmente distintos daqueles utilizados na calibração.

Na estimativa dos parâmetros calibráveis, tem-se a maior fonte de incertezas envolvendo a simulação hidrológica, dado ao ajuste meramente numérico (VIOLA *et*

al., 2009; PEREIRA, 2013), ou seja, no processo de escolha dos parâmetros e posteriormente seus ajustes, há maior fonte de erros na representação dos processos hidrológicos. Sarmiento e Koide (2011) discorrem que as incertezas presentes nos dados de entrada, nos parâmetros e na estrutura do modelo são refletidas nos resultados de saída ou nas faixas de adoção dos parâmetros, que devem ser avaliados pelo modelador. A necessidade de se avaliar as incertezas, não se deve somente para tornar claros os limites de aplicabilidade dos resultados simulados, mas primordialmente, obter maior confiabilidade sobre os resultados simulados.

Para estimar incertezas de modelos hidrológicos, vários são os métodos de avaliação (GUZMAN *et al.*, 2015). O aplicativo SWAT-CUP, por exemplo, programa desenvolvido por Abbaspour (2015), disponibiliza cinco algorítmicos de calibração, são eles: *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* – GLUE, *Parameter Solution* – ParaSol, *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm* - SUFI2, *Markov Chain Monte Carlo* – MCMC e *Particle Swarm Optimization* – PSO. Contendo no total onze funções objetivas (ALVES, 2018) e inclui aplicações como a visualização da área de estudo usando o Bing Map (ANDRADE *et al.*, 2017).

Áreas agrícolas são alvos desses estudos utilizando modelos hidrológicos robustos, visto a facilidade na utilização de bases de dados governamentais já consolidadas, resultando em análise dessas áreas com baixo custo de operação.

Nesse sentido, o largo cultivo do eucalipto tem sido responsabilizado como promotor de diversos conflitos socioambientais, principalmente no extremo sul da Bahia, trazendo a tona problemas como questões fundiárias, o uso do carvão, questões indígenas, roubo de madeira e desmatamento (BAHIA, 2008) e interferências no ciclo hidrológico natural, dentre eles, o uso do solo, a fauna, a flora e a pressão sobre os recursos hídricos (BAHIA, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2008). Inserida nesse contexto está a bacia do rio Peruípe, o qual, está situada no Extremo Sul da Bahia. A bacia do rio Peruípe é uma bacia dominada por aproximadamente 75% por eucalipto e pastagem, apresentando-se como uma área de conflitos socioambiental pela grande expansão da cultura do eucalipto na região. É sabida a falta de estudos que comprovem os impactos quantitativos frente aos recursos hídricos nessa bacia, os quais auxiliariam numa melhor gestão para os municípios de órgãos públicos.

Neste trabalho apresenta-se para bacia do rio Peruípe um modelo devidamente calibrado e validado, tornando possível o conhecimento dos parâmetros mais sensíveis

na referida bacia, como também, o conhecimento do comportamento das variáveis hidrológicas mais relevantes.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os parâmetros do SWAT, identificando aqueles mais sensíveis, levando em consideração as características locais de topografia, clima, tipos de solo e uso e ocupação, locais da Bacia Hidrográfica do rio Peruípe e com isso calibrar (2005 a 2013) e validar (1980 a 2002) o modelo em escala diária.

2 Material e métodos

A bacia do rio Peruípe (Figura 1), ottocodificação 77952, está localizada entre os paralelos 17° 22' 15,507" e 17° 55' 59,12" S e os meridianos 39° 10' 38,385" e 40° 31' 6,145 W, inserida no extremo sul do estado Bahia (ARAUJO, 2019). Limita-se ao norte pela bacia do Rio Itanhém, ao sul e oeste pela bacia do Rio Mucuri e a leste pelo oceano Atlântico. Ocupa uma área de 4.632 km² e abrange um perímetro de 464,15 km (SOUZA *et al.*, 2013; ARAUJO, 2019). O curso fluvial principal, denominado Rio Peruípe é formado após a confluência dos Rios Peruípe Norte e Peruípe Sul, e o canal principal possui extensão de aproximadamente 185 quilômetros.

Dentre os municípios que compõem a bacia do rio Peruípe estão os municípios de Caravelas e Nova Viçosa, sendo o 8° e o 13° maior do Brasil em área plantada de eucalipto com aproximadamente 732,96 km² e 531,08 km² respectivamente (ARAUJO, 2019).

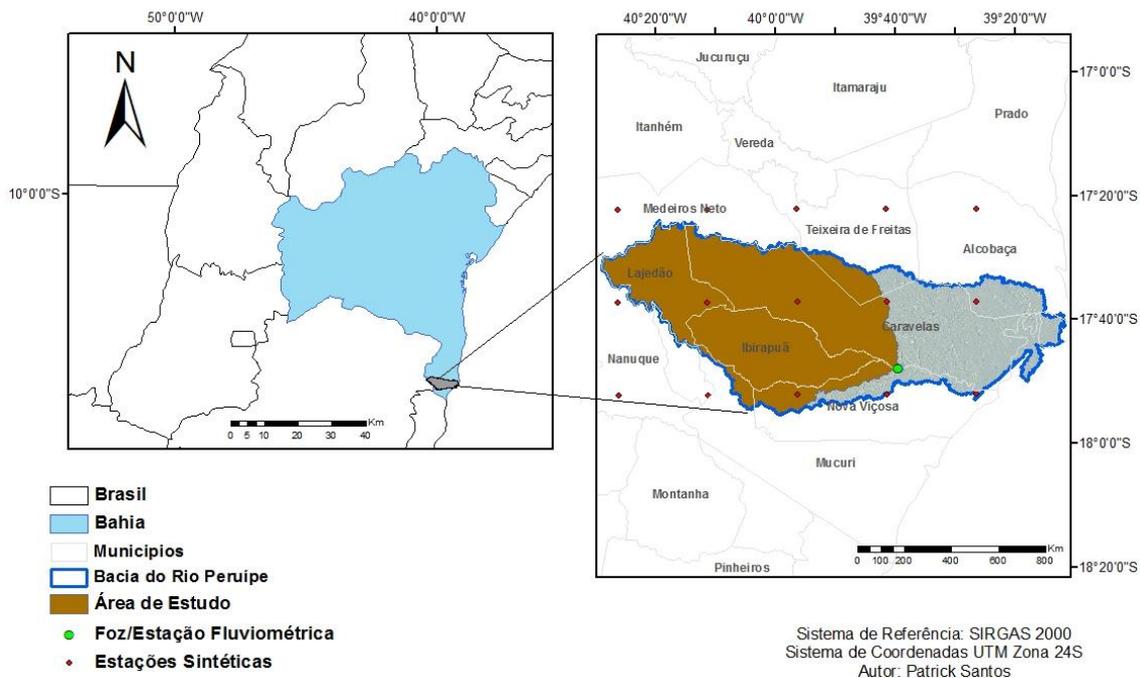


Figura 1. Limites da área de estudo na Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe.

1.1 Clima

O tipo climático predominante na área da bacia na bacia do rio Peruípe, segundo a classificação de Köppen, é o Am - Clima tropical úmido, sendo a temperatura do mês mais frio superior a 18°C e do mês mais quente superior a 22°C. A temperatura média anual da região é de 24,4°C, justificada por estar inserida na zonal de baixa latitude destacado pelos fatores de maritimidade, altitude e, conseqüentemente, uma inexpressiva amplitude térmica anual (SOUZA *et al.*, 2013; ARAUJO, 2019).

1.2 Vegetação e Geomorfologia

Presente na área que abrange a bacia do rio Peruípe, a Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica), ocupa os tabuleiros costeiros e as porções mais úmidas das serras próximas ao litoral. Essa formação congloera um diversificado mosaico de ecossistemas florestais com estruturas e composições florísticas características (ARAUJO, 2019).

Tabuleiros são conjuntos de formas de relevo de topo plano, elaboradas em rochas sedimentares, em geral limitadas por escarpas. Os tabuleiros apresentam altitudes

relativamente baixas (IBGE, 2009). A região do extremo sul baiano, onde está localizada a bacia do rio Peruípe, apresenta a unidade de tabuleiros costeiros muito dissecados, revelando colinas tabulares de topos planos a levemente arredondados, frequentemente sulcados por uma baixa rede de drenagem, apresentando vales encaixados de pequeno aprofundamento (IBGE, 2019).

1.3 Obtenção dos Dados de Entrada do Modelo SWAT para a Bacia do Rio Peruípe.

A obtenção e organização dos dados de entrada para o modelo SWAT remete a dados climáticos, dados de vazão, dados de superfície terrestre (declividade, uso e ocupação do solo), tipos de solo e dados de vazão, observados em estações fluviométricas. Na Figura 1 estão espacialmente distribuídas as estações sintéticas.

1.4 Dados Climáticos

Os dados climáticos utilizados nesse trabalho foram extraídos da base de dados interpolados por Xavier *et al.* (2015), o qual desenvolveu grades de alta resolução ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) de precipitação diária, evapotranspiração e as cinco variáveis climáticas necessárias para entradas no modelo (temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento).

As estações estão localizadas e nomeadas da seguinte forma: estação 1 ($40^\circ 26' 36.074''$ W e $17^\circ 21' 54.462''$ S); estação 2 ($40^\circ 11' 34.879''$ W e $17^\circ 21' 52.644''$ S); estação 3 ($39^\circ 56' 25.573''$ W e $17^\circ 21' 57.497''$ S); estação 4 ($39^\circ 41' 32.332''$ W e $17^\circ 21' 53.382''$ S); estação 5 ($39^\circ 26' 35.057''$ W e $17^\circ 22' 3.693''$ S); estação 6 ($40^\circ 26' 35.121''$ W e $17^\circ 36' 58.615''$ S); estação 7 ($40^\circ 11' 28.641''$ W e $17^\circ 36' 56.903''$ S); estação 8 ($39^\circ 56' 38.279''$ W e $17^\circ 36' 53.957''$ S); estação 9 ($39^\circ 41' 27.692''$ W e $17^\circ 37' 5.49''$ S); estação 10 ($39^\circ 26' 29.126''$ W e $17^\circ 36' 56.423''$ S); estação 11 ($40^\circ 26' 45.642''$ W e $17^\circ 52' 6.543''$ S); estação 12 ($40^\circ 11' 33.813''$ W e $17^\circ 52' 1.071''$ S); estação 13 ($39^\circ 56' 42.23''$ W e $17^\circ 52' 2.078''$ S); estação 14 ($39^\circ 41' 32.334''$ W e $17^\circ 51' 58.136''$ S); e estação 15 ($39^\circ 26' 30.919''$ W e $17^\circ 51' 52.995''$ S).

2.4.1 Declividade

Os dados sobre declividade ou relevo foram obtidos por meio de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (30m x 30m) (USGS, 2018), disponibilizando essas imagens gratuitamente. O processamento dessas imagens foi realizado com o software ArcGis 10.1, de modo a obter o modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC). Para a classificação dos dados de declividade do terreno da bacia do Rio Peruípe, foi considerada proposição da EMBRAPA (1979), adaptada com o agrupamento das classes de relevo.

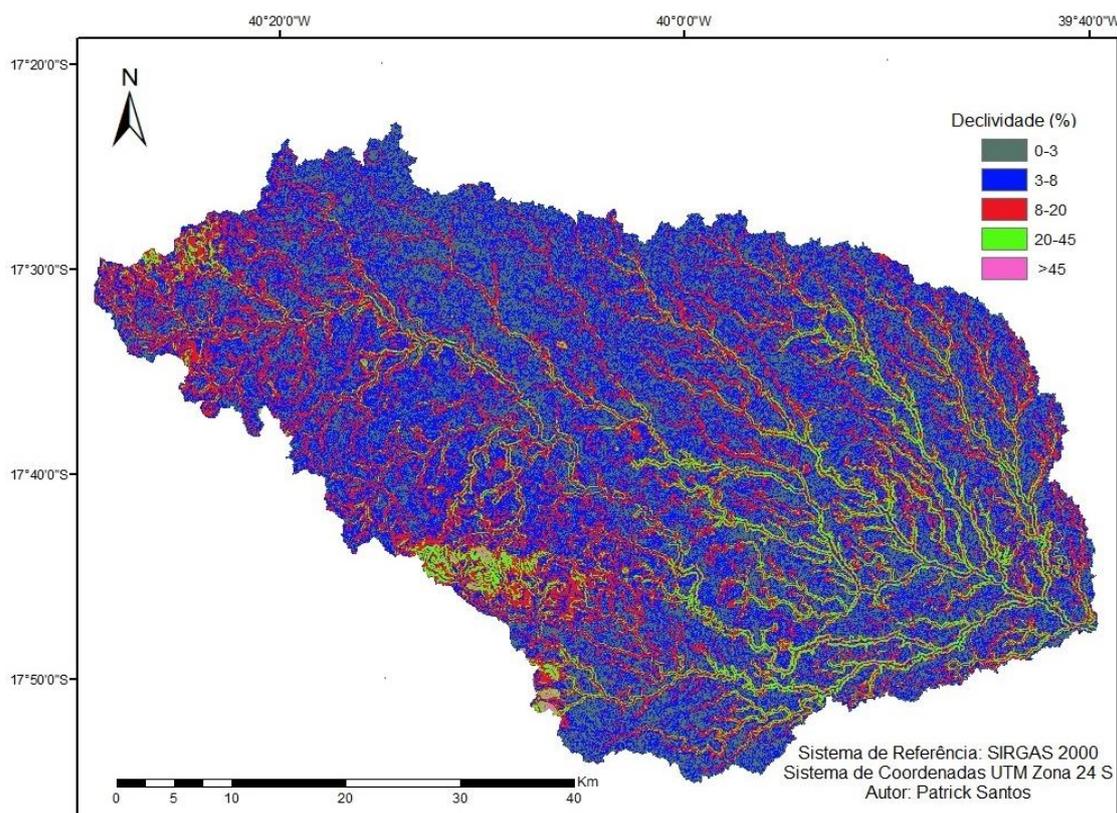


Figura 2. Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe.

2.4.2 Uso e Ocupação

O uso e ocupação do solo do solo pôde ser obtido por meio da definição do mapeamento do uso do solo na área de estudo realizado por Araújo (2019) e adaptado neste trabalho. Araújo (2019) utilizou cenas do satélite LANDSAT 8 – OLI/TIRS. O processamento digital das imagens para elaboração do mapa foi realizado por meio

software arcgis 10.5, e foi adotada a classificação automática supervisionada. As cartas possuem resolução espacial 30m por 30m (100 m infravermelho termal e 15 m pancromático), resolução radiométrica de 16 bits, resolução espectral de 11 bandas, área imageada de 185 km, formato Geotiff, datum horizontal WGS84, projeção UTM (ZONA 24S), nível de correção 1G (radiométrica e geométrica) (ARAUJO, 2019). As cartas foram obtidas junto ao U. S. Geological Survey (USGS, 2018). Neste levantamento, 7 usos e ocupações do solo estão identificados, são eles: Água (compreende lagos, rios e córregos), Área Urbana, Cana de Açúcar, Eucalipto, Mata Nativa, Pastagem e Solo Exposto.

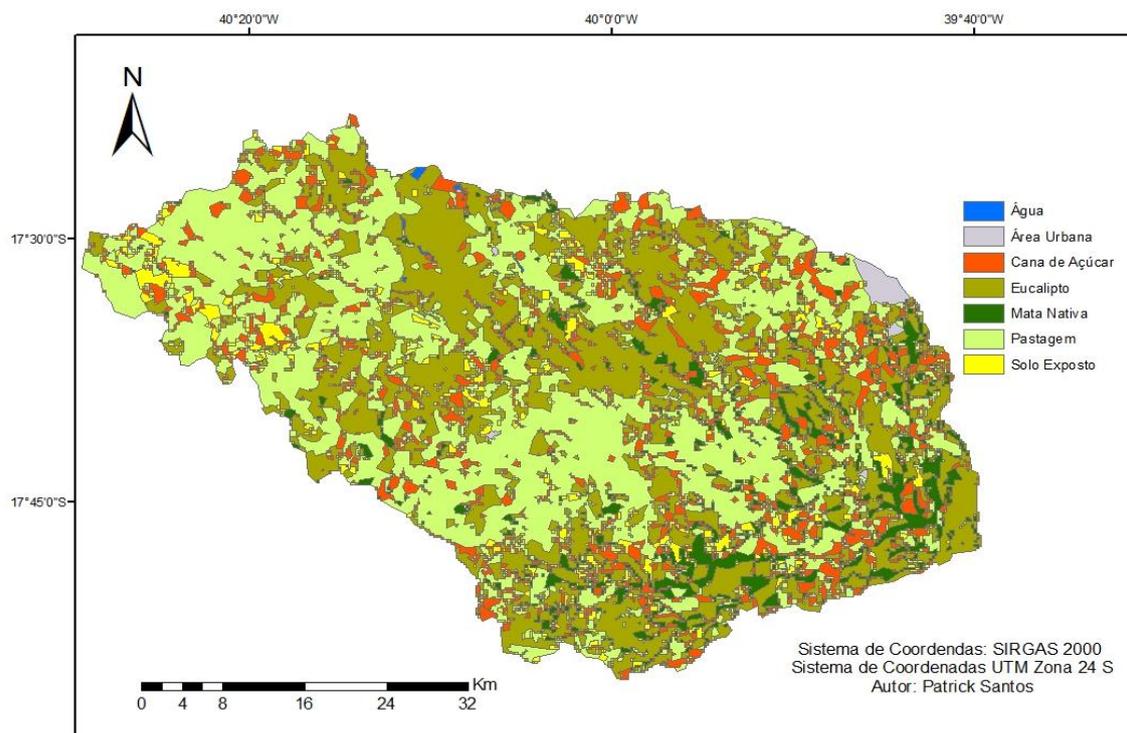


Figura 3. Mapa de Uso e Ocupação na Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe.

Na Tabela 1 estão descritas a extensão de cada uso e ocupação do solo da bacia do rio Peruípe.

Tabela 1. Uso e ocupação do solo da bacia do Rio Peruípe.

| Uso e ocupação | Área (km²) | Porcentagem (%) |
|-----------------------|------------------------------|------------------------|
| Eucalipto | 1015,62 | 34,40 |
| Mata Nativa | 193,19 | 6,54 |
| Água | 2,85 | 0,09 |
| Solo Exposto | 146,68 | 4,96 |
| Pastagem | 1201,12 | 40,68 |
| Cana de Açúcar | 375,63 | 12,72 |
| Área Urbana | 17,23 | 0,58 |

2.4.3 Tipos de Solo

Os dados de tipos de solo foram obtidos por meio dos metadados da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), o qual disponibiliza informações da região do Sul e extremo Sul da Bahia. Na Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe, segundo essa instituição, são encontradas as seguintes classes de solo: afloramentos rochosos, argissolo vermelho, gleissolo háplico e latossolo amarelo distrófico (Figura 4). No entanto, visto que as áreas de afloramentos rochosos ocupam apenas 0,13% da área total, essa classe foi considerada desprezível nesse estudo e, portanto, não incluída nas simulações.

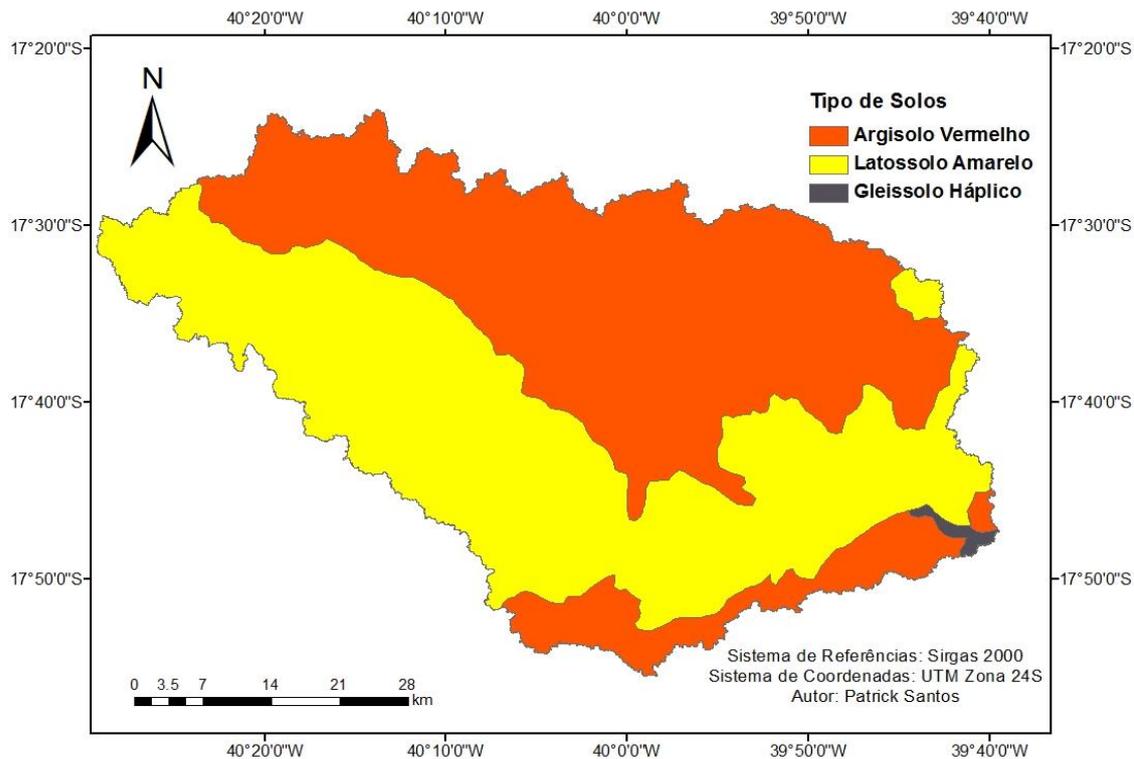


Figura 4. Mapa de tipo de solo da Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe.

2.5 Discretização das Subbacias e HRU's

A partir do Modelo Digital de Elevação no modelo SWAT, a Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe foi discretizada em 43 sub-bacias. As mesmas foram subdivididas em 1566 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU), que permitem ao modelo refletir diferentes tipos de solos, cobertura vegetal, topografia e uso do solo (UZEIKA, 2009). A espacialização das Sub-bacias estão dispostas na Figura 5.

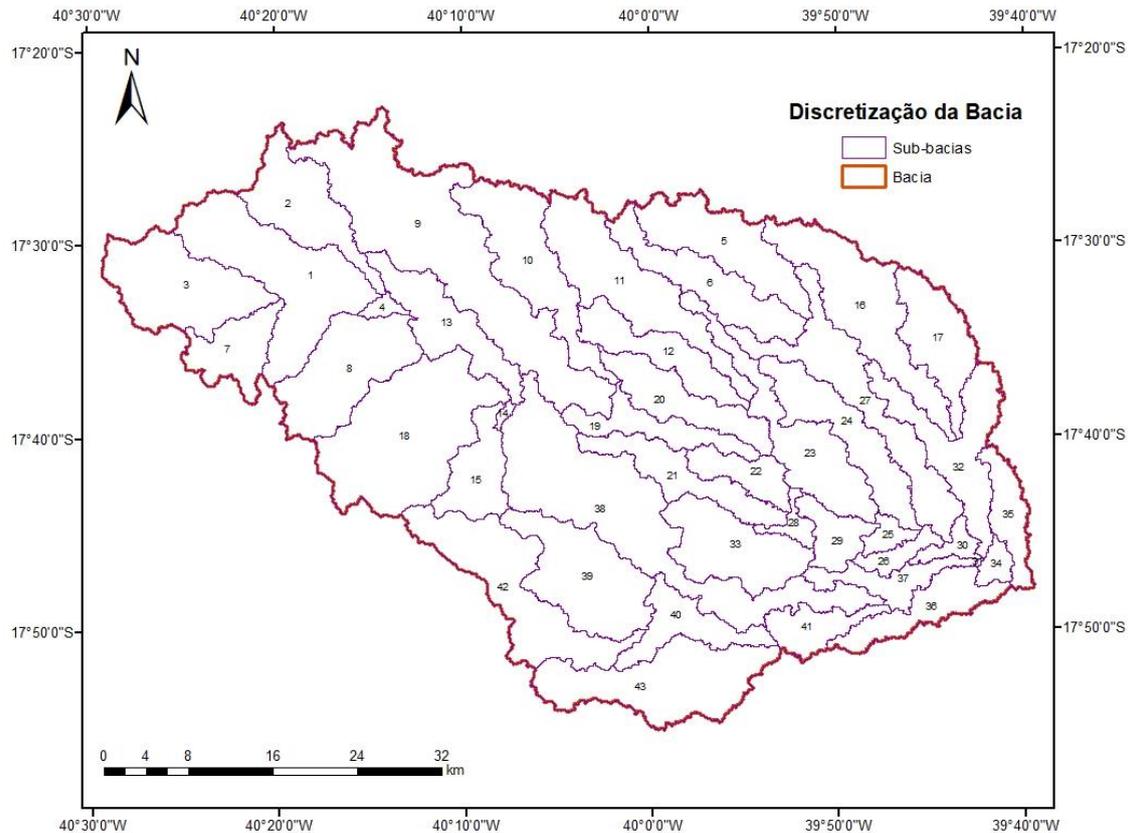


Figura 5. Sub-bacias discretizadas da Bacia Hidrográfica do rio Peruípe.

2.6 O modelo SWAT

Para simulação dos processos hidrológicos da bacia do rio Peruípe foi utilizado o modelo SWAT. Por sua vez, o modelo SWAT, é um modelo de tempo contínuo, ou seja, um modelo de produção em longo prazo. Não se trata de um modelo desenhado para simular detalhadamente eventos únicos (NEITSCH *et al.*, 2009; ARNOLD *et al.*, 2012).

O balanço hídrico, base conceitual do modelo SWAT, possibilita a quantificação do que acontece em bacias hidrográficas (NEITSCH *et al.*, 2009), sendo este derivado da equação da continuidade, como descrito a seguir:

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

Em que SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_0 é a quantidade inicial de água no solo no dia i (mm), t é o tempo (dias), Q_{surf} é a quantidade de escoamento superficial no dia i (mm), Ea é a evapotranspiração no dia i (mm), Q_{gw} é

a quantidade de fluxo de retorno no dia i (mm), $Wseep$ é quantidade de água que entra na zona vadosa no dia i (mm) e $Rday$ é a quantidade de precipitação no dia i (mm), (NEITSCH *et al.*, 2009).

Os métodos da Curva Número (SCS, 1972) e de Penman-Monteith (ALLEN, *et al.*, 1998) foram utilizados para calcular o escoamento superficial e a evapotranspiração, respectivamente.

Para suporte do modelo, trabalhando com interface associada, o presente estudou contou com o auxílio de um sistema de informações geográficas (SIG). Assim foi utilizado o ArcSWAT versão 2012, associado ao ArcGIS (ESRI – versão 10.1). No procedimento de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo, foi utilizado um terceiro software, o SWAT-CUP desenvolvido por Abbaspour (2015). O SWAT-CUP integra cinco algoritmos para análise de incerteza e calibração, sendo eles o SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol e MCMC.

Foi escolhido o algoritmo SUFI2 nesta metodologia para a realização da análise de sensibilidade, calibração e validação, pois o mesmo possui grande referência nos trabalhos científicos, possibilitando assim maior confiabilidade na metodologia escolhida. O SUFI2, que assim como os demais algoritmos, permite analisar a sensibilidade dos parâmetros, calibrar e demonstrar as incertezas contidas nos resultados, de forma semiautomática. Esse algoritmo utiliza do método do hipercubo latino para testar intervalos de valores de parâmetros definidos pelo usuário (ROUHOLAHNEJAD *et al.*, 2012).

Todas as informações dos dados de entrada estão contidas na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição dos tipos de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Peruípe.

| Dado de Entrada | Fonte |
|---|---|
| Modelo Digital de Elevação (MDE) – Resolução Espacial de 30 m | Imagens Shuttle Radar Topography Mission (SRTM – NASA) |
| Tipos de Solo | Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) |
| Dados Observados de Vazão da bacia do rio Peruípe. | Agência Nacional das Águas (ANA) |
| Dados de Uso e Ocupação do Solo | Próprio Autor |
| Dados Climáticos (1980 a 2013) | Estações Sintéticas (XAVIER et al., 2015) |

2.7 Análise de Sensibilidade

Para a realização da análise de sensibilidade, utilizando-se o algoritmo SUFI2, utilizou-se o método global (*all-at-a-time*) (ABBASPOU *et al.*, 2015). Avaliaram-se dois índices estatísticos (*t-stat* e *p-value*). Brighenti *et al.* (2017) descreve que o *t-stat* demonstra o grau de sensibilidade dos parâmetros, ou seja, se o coeficiente obtido na análise de regressão múltipla for diferente em relação ao erro padrão, o seu valor será diferente de zero, o que significa sensibilidade no parâmetro. O *p-value* por sua vez indica a significância da sensibilidade dos parâmetros testados, dessa forma, a partir de um teste de hipóteses, quanto mais próximo de zero, maior a significância no parâmetro.

Os parâmetros testados na análise de sensibilidade foram escolhidos com base na experiência do grupo de pesquisa do laboratório de hidráulica e hidrologia (LABHIDRO) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e com base em Arnold *et al.* (2012) no que diz respeito as variáveis normalmente citadas como sendo as mais importantes do modelo. Dentre os parâmetros testados na análise de sensibilidade 5 estão ligados ao fluxo de base (ALPHA_BF, GW_REVAP, GW_QMN, GW_DELAY,

e REVAPMN), 2 à evapotranspiração (ESCO e EPCO), 2 às características do solo (SOL_K e SOL_AWC), 2 ao fluxo no canal (CH_N2 e CH_K2) (ALVES, 2018), 3 ao escoamento superficial (CN2, OV_N e SURLAG), 1 ao escoamento lateral (LAT_TTIME) e 1 à percolação (RCHRG_DP).

De acordo com Alves (2018), no algoritmo SUFI2 são definidos intervalos de valores para teste desses parâmetros, e as inserções desses intervalos são realizadas por (i) substituição direta (o programa faz alterações do valor diretamente), (ii) adição (um valor constante, definido pelo usuário, é adicionado ao valor inicial do parâmetro), e (iii) por multiplicação (a alteração dos valores é estabelecida variando-se o valor inicial por porcentagem, podendo ser acrescentado ou retirado).

2.8 Calibração e Validação

No processo de calibração do modelo primeiramente é necessário a consideração de um período de aquecimento. De acordo com Arnold *et al.* (2012a) e Arroio Junior (2016), esse período, também conhecido como *warm-up*, é necessário devido as incertezas presentes nas condições iniciais de simulação, destacando as condições iniciais relacionadas ao movimento da água no solo. Dessa forma, o período de aquecimento adequado pode variar com a dimensão da bacia hidrográfica, cobertura do solo e precipitação anual. Neste trabalho este período foi definido em dois anos, como recomendado por Arnold *et al.* (2012a), 2003 a 2005. Para estes anos os dados de saída são desconsiderados.

A calibração é o próximo passo após o aquecimento do modelo. Arroio Junior (2016) descreve que o processo de calibração consiste na alteração dos parâmetros e constantes no modelo, visando melhorar o ajuste entre os dados simulados e os dados observados ou medidos, ou seja, o processo visa diminuir a diferença entre dados observados e simulados. Realizada a calibração, a etapa seguinte consiste na validação do componente de Interesse. Arnold *et al.* (2012a) descreve que a validação do modelo é o processo de simular o componente de interesse (ex. vazão) a fim de comprovar sua aptidão, na qual, os valores dos parâmetros ajustados na calibração são aplicados a uma série diferente da utilizada neste procedimento. Assim o período de calibração foi definido de 2005 a 2013 e o período de validação foi definido de 1980 a 2002. Esse

período para calibração foi escolhido a fim de atender o período correspondente ao uso e ocupação sendo próximo ao período das vazões observadas utilizadas na modelagem.

2.9 Avaliação de Desempenho

As estatísticas de precisão recomendadas por Moriasi *et al.* (2015) para avaliar o desempenho do modelo foram utilizadas nesse trabalho, são elas o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970), o percentual de viés (GUPTA *et al.*, 1999) e o coeficiente de determinação.

O coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE ou NSE) (Equação 2) é um dos critérios estatísticos mais utilizados para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos (BALTOKOSKI *et al.*, 2010), sendo que o mesmo pode variar entre um valor infinito negativo e 1, onde o valor 1 é indicado como o ajuste perfeito.

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,m})^2} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

Como descrito por Pereira (2013), o percentual de viés (PBIAS) é uma medida de tendência média das vazões simuladas serem maiores ou menores frente às observadas, ou seja, quando mais próximo de zero for o valor deste coeficiente melhor será a representação da realidade no modelo. O modelo está apresentado na Equação 3.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}} \right] \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Rodrigues (2012) descreve que o coeficiente de determinação é útil para medir a explicação da reta de regressão. Assim, quanto mais próximo de 1 estiver o valor do coeficiente de determinação, maior a porcentagem da variação de Y explicada pela reta estimada, e conseqüentemente, maior a qualidade do ajustamento. O cálculo está apresentado na Equação 4.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,m})(Q_{s,i} - Q_{s,m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{s,m})^2}} \right]^2 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde o NSE é o coeficiente de Nash Sutcliffe, adimensional; o PBIAS é o percentual de viés; o R^2 é o coeficiente de determinação; n é o número de pares observados e simulados; $Q_{o,i}$ é a vazão observada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $Q_{s,i}$ é a vazão simulada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $Q_{o,m}$ é a vazão média observada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $Q_{s,m}$ é a vazão média simulada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Os critérios de avaliação recomendados por Moriasi *et al.* (2015) estão listados na tabela abaixo.

Tabela 3: Critérios de avaliação para calibração de modelos hidrológicos para escala diário.

| Variável | Muito Bom | Bom | Satisfatório | Insatisfatório |
|-----------|----------------|-----------------------------------|--|----------------|
| R^2 | > 0.85 | $0.80 \leq R^2 \leq 0.85$ | $0.70 < R^2 < 0.80$ | ≤ 0.70 |
| NSE | > 0.85 | $0.70 \leq \text{NSE} \leq 0.85$ | $0.55 < \text{NSE} < 0.70$ | ≤ 0.55 |
| PBIAS (%) | $\leq \pm 3.0$ | $\pm 3.0 < \text{PBIAS} < \pm 10$ | $\pm 10 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 15$ | $> \pm 15$ |

Fonte: Moriasi *et al.* (2015).

Além desses índices estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo outras duas estatísticas para quantificar o ajuste do intervalo dos parâmetros, foram utilizadas, são elas o fator-p e o fator-r. Franco (2017) descreve que fator-p representa o percentual de observações (valores medidos) incluídos na 95ppu. Esse índice pode variar de 0 a 100%. O fator-r é a largura média da banda dividida pelo desvio padrão da correspondente variável medida, ela varia de 0 a ∞ . Abbaspour (2015) recomenda o fator $p \geq 70\%$ para a descarga, enquanto o fator $r \leq 1,5$.

3 Resultados e Discussão

3.1 Análise de Sensibilidade

Esta análise foi obtida após uma iteração com 500 simulações com o algoritmo SUFI2, na plataforma SWAT CUP. Assim como descrito na Tabela 4, utilizando um nível de significância de até 5%, os oito parâmetros mais sensíveis são: CN2, ESCO, CH_N2, CH_K2, ALPHA_BF, SOL_AWC, GW_REVAP e SURLAG. Embora, os oito primeiros sejam os mais sensíveis, ao nível de 5% de probabilidade, foram utilizados todos os parâmetros testados para calibração.

Tabela 4. Resultados da Análise de Sensibilidade para calibração de vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe, com os intervalos testados e índices *t-Stat* e *p-Value*

| Ranking | Parâmetro | Descrição | Intervalo Testado | Método | <i>t-Stat</i> | <i>p-Value</i> |
|---------|-----------|--|-------------------|---------------------|---------------|----------------|
| 1 | CN2 | Curva número inicial para condição de umidade do solo II (CN2) | -0.3 a 0.3 | Multiplicação | -36.9811 | 0.0000 |
| 2 | ESCO | Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo | 0 a 1 | Substituição Direta | -5.3691 | 0.0000 |
| 3 | CH_N2 | Coefficiente de Manning para o canal principal | 0.01 a 0.15 | Substituição Direta | 4.2065 | 0.0000 |
| 4 | CH_K2 | Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm h ⁻¹) | 0 a 15 | Substituição Direta | 3.9794 | 0.0000 |
| 5 | ALPHA_BF | Constante de Recessão do Fluxo de base (dias) | 0 a 0.1 | Substituição Direta | -3.9591 | 0.0000 |
| 6 | SOL_AWC | Armazenamento de água no solo | -0.3 a 0.3 | Multiplicação | 2.4622 | 0.0141 |
| 7 | GW_REVAP | Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação | 0.02 a 0.2 | Substituição Direta | 2.1532 | 0.0317 |
| 8 | SURLAG | Coefficiente de atraso do escoamento superficial | 0 a 24 | Substituição Direta | 2.0296 | 0.0429 |
| 9 | EPCO | Fator de compensação do consumo de água pelas plantas | 0 a 1 | Substituição Direta | 1.6743 | 0.0947 |
| 10 | SOL_K | Condutividade Hidráulica do Solo (mm h ⁻¹) | 0 a 1 | Multiplicação | 1.4912 | 0.1365 |
| 11 | LAT_TIME | Escoamento Lateral (dias) | 10 a 80 | Substituição Direta | 0.9918 | 0.3217 |
| 12 | GWQMN | Nível limite de água no aquífero livre para que possa ocorrer o fluxo de retorno | 0 a 800 | Substituição Direta | 0.9826 | 0.3262 |
| 13 | OV_N | Coefficiente de Manning para o escoamento superficial | 0.01 a 0.2 | Substituição Direta | -0.6799 | 0.4968 |
| 14 | GW_DELAY | Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias) | 30 a 500 | Substituição Direta | -0.5319 | 0.5949 |
| 15 | REVAPMN | Profundidade de água no aquífero para que ocorra a percolação | 0 a 1000 | Substituição Direta | -0.4832 | 0.6291 |

| | | | | | | |
|----|----------|---|------------|---------------|---------|--------|
| 16 | RCHRG_DP | Fração de Percolação do Aquífero profundo | -0.3 a 0.3 | Multiplicação | -0.4582 | 0.6469 |
|----|----------|---|------------|---------------|---------|--------|

De acordo com esse estudo, utilizando avaliação da sensibilidade global, o parâmetro mais sensível para a bacia do Rio Peruípe foi o CN2, sendo imprescindível seu ajuste para a calibração desta bacia. Khalid *et al.* (2016) discutem que um parâmetro pode ocupar diferentes rankings a depender do método utilizado para calibração, além, claro, da variação hidrológica que a sub-bacia pode ocasionar. Contudo, existem parâmetros que são primordiais ou bastante sensíveis para avaliar o regime de vazão na maioria das bacias, independentemente do método utilizado, como é o caso do CN2 apresentado por Khalid *et al.* (2016), que utilizando do método de análise global e local esteve entre os 5 parâmetros mais sensíveis.

Outros autores estudando o comportamento hidrológico em diversas bacias já haviam destacado este parâmetro, ocupando o primeiro lugar no ranking de sensibilidade, como no estudo de produção de água na bacia do Rio Catolé Grande (AMORIM, 2016), realizando a análise de sensibilidade local; no estudo da Avaliação da Influência da Implantação de Reservatório de Regularização no Regime de Vazões em região semiárida (ALVES, 2018), realizando o estudo da análise de sensibilidade de forma global; no estudo de Análise de Sensibilidade de parâmetros do Modelo SWAT em uma sub-bacia da Região Nordeste, Brasil (ANDRADE *et al.*, 2017); estudo do Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro (CARVALHO, 2014); e no estudo *Sensitivity analysis in watershad model using SUFI-2 algorithm* (KHALID *et al.*, 2016).

Na sequência, os 4 parâmetros mais sensíveis neste trabalho são estudados também por outros autores. Os parâmetros CH_K2, ALPHA_BF, apontados como mais sensíveis por Khalid *et al.* (2016), Lelis *et al.* (2012) e Silva (2010). Os parâmetros CH_N2 e ESCO são apontados como tendo sensibilidade por Silva (2010) e Andrade *et al.* (2017). Com relação aos demais parâmetros considerados menos sensíveis neste estudo, outros autores também identificaram alguma sensibilidade nos mesmos. Os parâmetros SOL_AWC, SURLAG, GWREVAP e GW_DALAY, são apontados como sensíveis por Silva (2010) e Andrade *et al.* (2017). O parâmetro RCHRG_DP é considerado sensível para Andrade *et al.* (2017) e Brighenti *et al.* (2016).

Arnold *et al.* (2012) também descreve a respeito de alguns desses parâmetros, quando observa a frequência que alguns deles são testados numa revisão de 64 trabalhos. São observados por esse autor o parâmetro RCHRG_DP, sendo testado 14 vezes, o parâmetro REVAPMN, testado 13 vezes, o parâmetro GWQMN, testado 12 vezes, o parâmetro EPCO, testado 10 vezes e o parâmetro OV_N, testado 8 vezes. Cabe ressaltar, que dentre os parâmetros pouco sensíveis neste trabalho, o parâmetro LAT_TIME, que descreve o tempo de propagação do escoamento lateral, não apresentou sensibilidade satisfatória, corroborando com Arnold *et al.* (2012) que identificou apenas um trabalho, dentre 64, utilizando este parâmetro.

3.2 Calibração e Validação

A calibração do modelo SWAT na Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe foi realizada na escala temporal diária com uma iteração de 500 simulações. Como destacado por Abbaspour *et al.* (2004), o algoritmo SUFI2 não resulta de uma única solução, mas sim um conjunto de boas soluções expressas pelo 95PPU, gerado por determinados intervalos de parâmetros. Os 16 parâmetros testados na análise de sensibilidade foram mantidos na calibração e os seus respectivos intervalos calibrados estão expressos na Tabela 5. Após cada interação, os intervalos podem apresentar valores fora do intervalo inicial utilizado na análise de sensibilidade, isso se deve ao fato do SWAT-CUP sugerir novos valores de intervalos, visando sempre a otimização da função objetivo (ABBASPOUR *et al.*, 2018; ALVES, 2018).

Tabela 5. Valores dos parâmetros obtidos na calibração do modelo SWAT com o algoritmo SUFI2 para Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe para escala temporal diário.

| Parâmetro | Método | Valor do parâmetro na melhor simulação | Intervalo | |
|-----------|---------------------|--|--------------|--------------|
| | | | Valor Mínimo | Valor Máximo |
| CN2 | Multiplicação | -0.4943300 | -0.500000 | -0.200000 |
| ESCO | Substituição Direta | 0.731720 | 0.620000 | 0.740000 |
| CH_N2 | Substituição Direta | 0.212630 | 0.140000 | 0.230000 |
| CH_K2 | Substituição Direta | 5.025000 | 4.380000 | 6.100000 |
| ALPHA_BF | Substituição Direta | 0.621960 | 0.620000 | 0.900000 |
| SOL_AWC | Multiplicação | -0.009245 | -0.250000 | 0.019000 |
| GW_REVAP | Substituição Direta | 0.062407 | 0.049000 | 0.090000 |
| SURLAG | Substituição Direta | 5.917730 | 3.320000 | 7.250000 |
| EPCO | Substituição Direta | 0.855350 | 0.820000 | 0.870000 |
| SOL_K | Multiplicação | 0.254380 | 0.220000 | 0.400000 |
| LAT_TIME | Substituição Direta | 15.590000 | 10.000000 | 20.000000 |
| GWQMN | Substituição Direta | 610.409973 | 438.000000 | 648.000000 |
| OV_N | Substituição Direta | 0.232550 | 0.190000 | 0.240000 |
| GW_DELAY | Substituição Direta | 476.536987 | 401.000000 | 500.000000 |
| REVAPMN | Substituição Direta | 344.622009 | 240.000000 | 346.000000 |
| RCHRG_DP | Multiplicação | 0.090877 | 0.049000 | 0.130000 |

Com relação ao parâmetro CN2, notou-se redução de 49,43%, orientado para redução do escoamento superficial. Para este parâmetro esta redução nos estudos de bacias brasileiras não é incomum, Amorim (2016) e Alves (2018) relataram redução deste parâmetro para uma bacia do semiárido baiano de 24,21% e 30,27 respectivamente. Enquanto isso, Arroio Junior (2016) no estudo de cinco bacias no Estado de São Paulo relataram redução do parâmetro CN2 de 13,2%, 17,4%, 14,4%, 2,3% e 19,1% na escala mensal. Fukunaga *et al.* (2015) identificou uma redução de 9,4% deste parâmetro numa bacia tropical no Brasil.

De acordo com Guse *et al.* (2017) a influência dos parâmetros nos critérios de desempenho depende da relevância do processo correspondente. No caso em que a relevância do processo associado ser muito baixa, parâmetros de outros processos mais dominantes controlam os critérios de desempenho. Isso é mostrado, por exemplo, para o CN2. Seu impacto sobre os critérios de desempenho na bacia hidrográfica do Rio

Peruípe é relativamente alto devido alta contribuição de fluxo superficial, com base nas simulações.

A redução no parâmetro CN2 é ainda justificado por Fukunaga *et al.* (2015), quando descreve que altos valores nesse parâmetro, modelado no SWAT, pode indicar que os valores de referência inicialmente assumidos eram muito altos. Outra sugestão, relacionado as condições físicas do solo, é que possivelmente essas propriedades, como capacidade de infiltração e práticas de manejo do solo, não tenham sido refletidas adequadamente nos valores iniciais deste parâmetro.

Com relação ao ajuste do modelo para bacia do Rio Perúipe (Figura 5), observa-se que em alguns períodos do hidrograma, é possível afirmar subestimação das vazões simuladas. De acordo com Alves (2018), esse comportamento está associado com a dificuldade de modelos hidrológicos representarem vazões de pico, sendo acentuada quando se trabalha com escala diária.

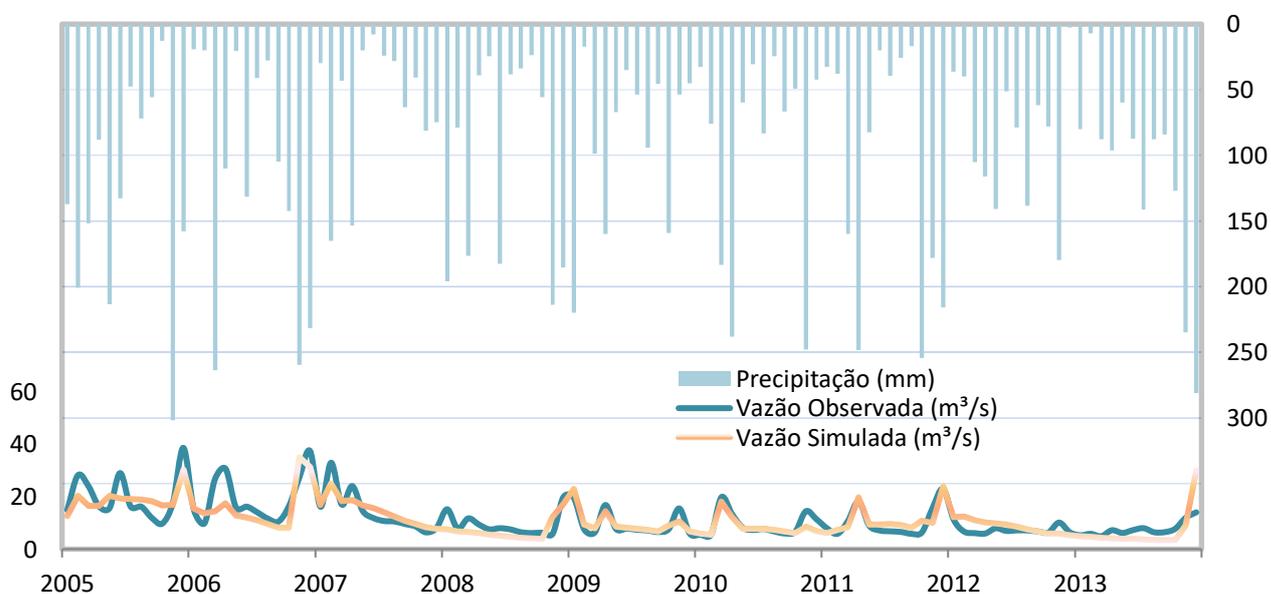


Figura 5. Hidrograma das vazões simuladas e observadas e hietograma para os períodos de calibração (2005-2013).

Quanto aos índices estatísticos (Tabela 5), é valido destacar que os valores obtidos na escala temporal diário para o percentual de viés (PBIAS) foram classificados como ‘Bom’, o coeficiente de determinação (R^2) foi classificado como ‘Satisfatório’ e o coeficiente NSE foi classificado como ‘Bom’, conforme critério adotado neste trabalho e proposto por Moriasi *et al.* (2015).

Tabela 5. Estatística de desempenho do modelo SWAT para os processos hidrológicos na bacia do Rio Peruípe, considerando o período de calibração na escala temporal diário.

| Variável | Resultado da calibração | Valor mínimo aceitável |
|----------------|-------------------------|------------------------|
| R ² | 0.72 (Satisfatório) | > 0.70* |
| NSE | 0.71 (Bom) | > 0.55* |
| PBIAS (%) | 5.40 (Bom) | ≤ ± 15* |
| Fator P | 0.86 | ≥ 0.70** |
| Fator R | 1.58 | ≤ 1.5** |

*Valores mínimos para o ajuste satisfatório, recomendado por Moriasi *et al.* (2015).

**Valores Limites para os fatores P e R para calibração de vazão, recomendado por Abbaspour *et al.* (2015)

Por meio dos índices R², NSE e PBIAS, pode-se observar bons desempenhos para o estudo das vazões diárias na bacia do rio Peruípe. Observa-se também, frente aos coeficientes estatísticos, que existe dificuldade em modelar processos hidrológicos a nível diário, utilizando o fator R.

Cabe ressaltar que os valores dos índices estatísticos, R², NSE e PBIAS, obtidos neste trabalho estão semelhantes aos resultados obtidos nos estudos de outras bacias hidrográficas brasileiras. Silva e Christofaro (2017) ao modelar vazões mensais para a bacia do rio Jequitinhonha encontraram valores de R² e NSE de 0.62 e 0.53 respectivamente. Pereira (2013), ao simular a bacia do Rio Pomba, relatou um NSE de 0.73, classificando o desempenho como ‘bom’. Me *et al.* (2015), estudando os efeitos hidrológicos com base nos critérios de desempenho do modelo SWAT, numa bacia na Nova Zelândia, constatou R² de 0.77, PBIAS de 0.78 e NSE de 0.73, sendo as duas primeiras classificadas como ‘muito bom’ e a última como ‘bom’.

Com relação ao fator R, nota-se que o valor ficou acima do recomendado por Abbaspour *et al.* (2015) para a análise global, mostrando que a espessura da banda 95PPU é maior do que a ideal, necessitando de melhores ajuste para diminuí-la. No entanto, dentre 203 simulações, considerando um NSE de 0.5 (critério de parada), o fator R demonstrou valor de 0,67. Por outro lado o valor do fator P superou as expectativas na estimativa global, demonstrando abrangência de 83% dos dados observados, dentro da 95PPU.

Sabe-se que no Brasil ainda há poucos registros a respeito dos fatores P e R (ALVES, 2018). Franco (2017) utilizando quatro diferentes estratégias de calibração na bacia hidrográfica do rio Iguaçu identificou valores médios entre 0.60 a 0.86 para o

fator P e 0.53 a 1.20 para o fator R. Bertani (2014), estudando a influência da expansão agrícola no Cerrado do Meio Norte do Mato Grosso do Sul, identificou um fator P de 0.92 e um fator R de 0.24 no período de 1981 a 1990, para o período de 2001 a 2010 esses índices resultaram em 1 para o fator P e 0.42 para o fator R.

Assim, os valores obtidos neste trabalho para esses dois fatores, indicam que as incertezas preditas nos dados simulados estão adequadas para a modelagem de vazões diárias na bacia do rio Peruípe. No total, a série histórica de dados observados contem 33 anos, sendo 9 anos utilizados para a calibração, o que certamente representa uma boa amostragem do sistema hidrológico local.

A partir da validação foi verificado que o modelo conseguiu representar os processos hidrológicos ligados ao regime de vazões, em período distinto da calibrada, da bacia hidrográfica em questão, como mostrado na Tabela 8.

Após a validação, os coeficientes estatísticos dessa etapa foram fixados como ‘Satisfatório’ para o coeficiente de determinação, ‘Satisfatório’ para o valor de NSE e ‘Bom’ para o Percentual de Viés. Na análise de incerteza, utilizando-se a estatística de 95PPU do SWAT-CUP, o qual complementam os demais parâmetros estatísticos, os valores do fator R e fator P foram de 1,01 e 0,66 respectivamente, ou seja, é encontrando-se dentro da faixa recomendada por Abbaspour *et al.* (2015), apenas o fator R.

Tabela 8. Estatística de desempenho do modelo SWAT para a calibração e validação na bacia do rio Peruípe, considerando o período de calibração na escala temporal diária.

| Variável | Resultado da calibração | Resultado da validação | Valor mínimo aceitável |
|----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| R² | 0.72 (Satisfatório) | 0.63 (Satisfatório) | > 0.60* |
| NSE | 0.71 (Bom) | 0.58 (Satisfatório) | > 0.50* |
| PBIAS (%) | 5.40 (Bom) | 9.9 (Bom) | ≤ ± 15* |
| Fator P | 0.86 | 0.66 | ≥ 0.70** |
| Fator R | 1.58 | 1.01 | ≤ 1.5** |

4 Conclusão

A análise de sensibilidade global indicou que os parâmetros do SWAT mais sensíveis na Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe, a 5% de significância, são: CN2, ESCO, CH_N2, CH_K2, ALPHA_BF, SOL_AWC, GW_REVAP e SURLAG,

demonstrando que os processos de escoamento superficial, movimento da água no solo e no canal principal são maiores influenciadores do regime de vazão na referida bacia.

No que se refere aos coeficientes estatísticos, a calibração e validação do modelo SWAT nesta pesquisa atendeu aos critérios propostos para NSE, R^2 e Pbias. Foram obtidos também maiores abrangências dos dados observados dentro da estatística de precisão (*p-factor*), 95PPU.

Considerando o resultado da estatística de desempenho do modelo, obtidos para a Bacia Hidrográfica do Rio Peruípe e tomando como base bibliografias relacionadas a modelagem hidrográfica com o modelo SWAT, as quais são comparadas a fim de entendimento dos processos hidrológicos para a bacia, destaca-se que o modelo foi devidamente calibrado. Se tratando de um modelo matemático e com possibilidade de melhores ajustes, cabe ressaltar que este trabalho apresenta perspectivas para refinamentos em passo de tempo diário, apresentando também, perspectivas para mudanças de cenários na bacia do rio Peruípe, frente à transformação espacial do uso e ocupação do solo na série histórica estudada.

5 Referências

ABBASPOUR, K. C., VAGHEFI, S. A., SRINIVASAN, R. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 International SWAT Conference. 2018.

ANDRADE, C. W. L., MONTENEGRO, S. M. G. L., LIMA, J. R. S., MONTENEGRO, A. A. A., SRINIVASAN, R. DE. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da região Nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 440-453, 2017.

ALVES, L. F. ALVES. INFLUÊNCIA DE RESERVATÓRIOS DE REGULARIZAÇÃO NO REGIME DE VAZÕES DA BACIA DO RIO CATOLÉ GRANDE. 2018.

ALMEIDA, T. M., MOREAU, A. M. S. S., MOREAU, M. S., PIRES, M. M., FONTES, E. O., GÓES, L. M. Reorganização socioeconômica no extremo sul da Bahia decorrente da introdução da cultura do eucalipto. **Sociedade & Natureza**, v. 20, n. 2, p. 5-18, 2008.

ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, M. J., SRINIVASAN, R., SANTHI, C. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARNOLD, J.G.; KINITY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. (2012a). Input/Output Documentation Version 2012. Texas Water Resources Institute. 650p.

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

ABBASPOUR, K. C., YANG, J., MAXIMOV, I., SIBER, R., BOGNER, K., MIELEITNER, J., ZOBRIST, J., SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of hydrology**, v. 333, n. 2-4, p. 413-430, 2007.

ABBASPOUR, C. K. SWAT calibration and uncertainty programs. **A User Manual. Eawag Zurich, Switzerland**, v. 20, 2015.

ARAÚJO, K. P. B. INFLUÊNCIA DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PERUÍPE – BA. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB). Bahia. 2019.

BALTOKOSKI, V., TAVARES, M. H. F., MACHADO, R. E., OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro-Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 253-261, 2010.

BAHIA, [IMA] Instituto do Meio Ambiente. *Silvicultura Do Eucalipto No Sul e Extremo Sul Da Bahia: Situação Atual E Perspectivas Ambientais*. Salvador - BA, p.5. 2008.

BRIGHENTI, T. M., BONUMÁ, N. B. CHAFFE, P. L. B., GRISON, F. KOBIYAMA, M. Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: estudo de caso do o modelo SWAT. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017)**. Anais [recurso eletrônico].[Porto Alegre: ABRH, 2017], 2017.

BLAINSKI, É., ACOSTA, E., NOGUEIRA, P. C. P. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 2, p. 226-237, 2017.

BRIGHENTI, T. M., BONUMÁ, N. B., CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **RBRH**, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.

CARVALHO, F. H. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. 2014.

FRANCO, A. C. L. Calibração do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada. 2017.

GUZMAN, J. A., SHIRMOHAMMADI, A., SADEGHI, A. M., WANG, X., CHU, M. L., JHA, M. K., PARAJULI, P. B., HARMEL, R. D., KHARE, Y., & HERNANDEZ, J. Uncertainty considerations in calibration and validation of hydrologic and water quality models. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1745-1762, 2015.

KHALID, K., ALI, M. F., RAHMAN, N. F. A., MISpan, M. R., HARON, S. H., OTHMANA, Z., BACHOK, M. F. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. **Procedia engineering**, v. 162, p. 441-447, 2016.

LELIS, T. A. Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT. 2011.

MORIASI, D. N., GITAU, M. W., PAI, N., & DAGGUPATI, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015.

NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., J.R. Kiniry, WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

PEREIRA, D. R. Simulação hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Pomba usando o modelo SWAT. **Embrapa Cerrados-Tese/dissertação (ALICE)**, 2013.

ROUHOLAHNEJAD, E., ABBASPOUR, K.C., VEJDANI, M., SRINIVASAN, R., SCHULIN, R., LEHMANN, A. **Parallelization framework for calibration of hydrological models. Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 28-36, 2012.

RODRIGUES, S. C. A. **Modelo de regressão linear e suas aplicações**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior.

SARMENTO, L., KOIDE, S. Análise de Incertezas em modelos hidrológicos. WRA Proceedings: XIV World Water Congress, 25-29 Sept 2011, Pernambuco, Brazil.

SILVA, N. D. M., CHRISTOFARO, C. Calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão em sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha. **Revista Geografias**, p. 31-39, 2017.

SILVA, L. R. S. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. 2010.

STRAUCH, M. BERNHOFER, C. KOIDE, S. VOLK, M. LORZ, C. MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 414, p. 413-424, 2012.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. 2009.

VIOLA, M. R., MELLO, C. R., ACERBI JR, F. W., SILVA, A. M. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

XAVIER, A. C., KING, C. W. SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

Capítulo 3

INFLUÊNCIA DA CULTURA DO EUCALIPTO NO REGIME DE VAZÕES MÁXIMA, MÉDIAS E MÍNIMAS DO RIO PERUIPE

Patrick dos Santos Silva¹, Danilo Paulúcio da Silva², Jhones da Silva Amorim², Lais Alves Fernandes².

Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais - PPGCA, Universidade Estadual do Sudoeste da BahiaUESB, Campus Universitário Juvino Oliveira, Rodovia BR 415, km 04, 45.700-000 - Itapetinga - BA, Brasil. Telefone:+55 (77) 3261-8631. Site: <http://www.uesb.br/ppgca>. E-mail: ppgca@uesb.edu.br.

Resumo

As áreas de novos plantios comerciais de eucalipto têm aumentado consideravelmente em regiões tropicais. No Brasil, as áreas de eucalipto chegam a mais de 4,5 milhões de hectares. A expansão dessa cultura tem se tornado possível em detrimento de outros plantios, principalmente da pastagem. É sabido que toda mudança no uso e ocupação do solo provoca alterações no balanço hídrico, podendo acentuar os efeitos na bacia, decorrentes de eventos de cheias ou estiagem. Apesar de muitas hipóteses sobre o real impacto da expansão do eucalipto em regiões brasileiras, ainda é necessário melhor conhecimento acerca dos resultados deste impacto, quanto a disponibilidade hídrica, em diversas bacias do país. Nesse sentido, a aplicação de modelos de simulação ambiental tem contribuído para o entendimento do comportamento de diversas culturas sobre a dinâmica de bacias hidrográficas, sendo importante ferramenta de previsão de cenários futuros baseados em alterações de uso e ocupação do solo. Nesse estudo objetivou-se investigar o comportamento das vazões mínimas, médias e máximas, frente a mudança de cenário causada pela expansão do eucalipto na região do extremo sul da Bahia, bacia do rio Peruípe, utilizando como ferramenta a modelagem hidrológica a partir do modelo SWAT. O modelo foi calibrado e validado utilizando o SWAT-CUP. Foram utilizados dados de relevo obtidos a partir do modelo digital de elevação, mapa de classes de solo, mapa de cobertura do solo, dados climáticos diários e mensais, bem como dados fluviométricos, coletados na estação Helvecia de código 55510000. Para análise das vazões médias e mínimas, foram considerados 4 cenários distintos: cenário A (cenário atual), cenário B (cenário onde houve a substituição de toda área de eucalipto por pastagem), cenário C (cenário onde houve a substituição de toda pastagem por eucalipto) e cenário D (cenário onde houve a substituição do eucalipto por mata nativa). Nos cenários B, C e D, foram mantidos os demais usos, de acordo com o cenário atual. Os resultados para a avaliação das vazões nos cenários distintos indicaram maiores escoamentos superficiais em áreas de pastagens, principalmente o cenário B. Observou-se também redução das vazões mínimas, médias e máximas no cenário C, aumentando ainda neste cenário a lamina de evapotranspiração. Com relação a vazões mínimas, observou-se aumento da Q_{90} (vazão com 90% de permanência) para o cenário D em relação ao cenário A. Com relação a vazões máximas, é possível observar que a cultura do eucalipto reduziu picos de vazões máximas.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, recursos hídricos, geoprocessamento.

1 Introdução

A bacia do rio Peruípe é de grande importância ambiental, principalmente no tocante aos recursos hídricos, destacando a sua intensa exploração pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (EMBASA) (SOUZA *et al.*, 2013). A região hidrográfica é ainda bastante estudada principalmente pela ameaça à fauna e flora local, sendo as Áreas de Proteção Ambiental os objetos de estudo principais (Martins-Pinheiro *et al.*, 2007). A bacia do rio Peruípe abrange os municípios de Caravelas, Ibirapuã, Lajedão, Nova Viçosa e Teixeira de Freitas. O clima local varia de úmido à subúmido (faixa litorânea), para subúmido à seco (interior) (SANTOS *et al.*, 2004).

Em estudos realizados entre os anos 2000 e 2020 na bacia do rio Peruípe, pesquisadores identificaram que a cultura do eucalipto tomou proporções elevadas no uso e ocupação do solo, trazendo diversas hipóteses e questionamentos da sociedade. Almeida *et al.* (2008) destacam que a inserção da cultura do eucalipto no extremo sul baiano, apesar de beneficiar economicamente a região, trouxe diversos prejuízos, dentre eles a degradação dos recursos hídricos. Araújo (2019) corrobora com essa afirmação, pois em seu estudo, o qual identificou o crescimento das áreas plantadas por eucalipto e redução proporcional da cobertura de pastagem entre 1990 e 2014, identificou a redução das vazões máximas, médias e mínimas. Em seu estudo para a bacia do rio Peruípe, a Q7, Q90 e Q95 no período de 1990 a 2014 sofreram redução de 30,5%, 35,57% e 25,58% respectivamente em relação ao período de 1975 a 1989.

É sabido que a formação de florestas plantadas em larga escala requer a elaboração de um estudo de impactos ambientais, destacando técnicas e instrumentos que visem somar resultados ao estudo. Nesse sentido, é evidente que estes possíveis impactos ambientais não são inerentes às florestas, quando relacionados aos recursos hídricos, mas decorrem da interação do manejo com as condições do meio, ou seja, os impactos podem ocorrer de forma mais intensa ou menos intensa, assim como podem ser minimizados pela adoção de estratégias de manejo que levem em conta as potencialidades e limitações do meio (MENDES *et al.*, 2007).

Relacionado à questão meramente ambiental, o reflorestamento com eucalipto, em geral, é uma atividade polêmica, resultado de uma opinião pública generalizada que lhe atribui efeitos ecológicos adversos, relacionados com o consumo de água e perdas de solo e de nutrientes, constituindo-se nos chamados efeitos ecológicos do

reflorestamento (MENDES *et al.* 2007; TADEU, 2014). Por outro lado, é possível que as plantações florestais assumam grande importância contribuindo para a recuperação das condições hidrológicas de bacias degradadas, com o objetivo de melhorar a qualidade da água produzida na mesma. Para isso, mesmo que o fim seja econômico, deve-se haver um tempo determinado para o estabelecimento da cultura, além disso, deve-se contar com adoção de controle de processo de escoamento superficial, erosão e reciclagem de nutrientes (TADEU, 2014).

Dessa forma, o efeito combinado das variações no uso e ocupação do solo e gestão inadequada, derivada da substituição das matas nativas, na maioria das vezes não planejadas ou mal planejadas, ocasionam o aumento da degradação ambiental (ALVES, 2018; XAVIER e SILVA, 2018), sendo refletidos principalmente nos meios rurais com o aumento dos processos erosivos (SIQUEIRA *et al.*, 2016; ALVES, 2018) e degradação hídrica. Torna-se então necessário o estudo da variação espacial e temporal, para compreensão dos regimes de vazões, as quais devem ser analisadas cuidadosamente, para tomadas de decisões no gerenciamento dos recursos hídricos. De acordo com Setti (2001), o acompanhamento e o controle de informações a respeito dos recursos hídricos, principalmente com relação a captação, formam a base para uma boa gestão em dada região.

No que tange às ações, principalmente, governamentais, é de suma importância estudar as tendências futuras da dinâmica temporal, influenciados pela mudança nos usos do solo, para o planejamento ambiental. O desenvolvimento das atividades humanas gera consequências notáveis, dentre elas a mudança no uso e ocupação do solo, sendo acarretadas pelo crescimento urbano e pelo estabelecimento de cultivos em áreas naturais (XAVIER e SILVA, 2018).

Para a análise do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, levando-se em consideração a alteração no uso do solo e conseqüentemente a variação nos regimes de vazões, os modelos hidrológicos tem se consolidado como ferramentas para simulação ambiental, sendo necessárias para a previsão de cenários (SIQUEIRA, *et al.*, 2016). De acordo com Andrade *et al.* (2017), dentre vários modelos internacionais, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido utilizado com bastante ênfase, pois se trata de um modelo de grande complexidade abrangendo diversos componentes hidrossedimentológicos.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo consistiu em avaliar a alteração no regime de vazões da bacia do rio Peruípe, identificando os impactos causados em

decorrência da mudança do uso do solo, sobretudo pela cultura do eucalipto, a partir do modelo SWAT. Tal proposta de estudo justifica-se pelas intensas transformações no uso e na ocupação do solo na área em estudo, principalmente no que se refere a expansão da silvicultura do eucalipto, sendo pautas de debates e estudos socioambientais. Justifica-se também pela inexistência de estudos que definam os aspectos de variação no regime de vazões, devido à alteração no uso e ocupação do solo da bacia do rio Peruípe.

2 Material e métodos

2.1 Área de estudo

A bacia do rio Peruípe (ottobacia 77952) está localizada entre os paralelos 17° 30' e 18° 00' S e os meridianos 39° 00' e 40° 30' W, sendo limitada ao norte pela Bacia do Rio Itanhém, ao sul e oeste pela Bacia do Rio Mucuri, e a leste pelo Oceano Atlântico (SARMENTO-SOARES *et al.*, 2007). A bacia ocupa uma área de 4.632 km² e abrange um perímetro de 464,15 km (SOUZA *et al.*, 2013; ARAUJO, 2019). O curso fluvial principal, denominado rio Peruípe é formado após a confluência dos rios Peruípe Norte e Peruípe Sul. O canal principal possui aproximadamente 185 quilômetros desde a sua nascente até sua foz. O rio Peruípe Sul nasce a aproximadamente 345 m de altitude, no município de Ibirapuã, próximo à divisa estadual Minas Gerais e possui sentido de escoamento nordeste até sua confluência com o rio Peruípe Norte (SARMENTO-SOARES *et al.*, 2007). A bacia do rio Peruípe apresenta, predominantemente relevo Plano (46,3%) (FARIAS *et al.*, 2020).

Para atender os objetivos desta pesquisa, a área de estudo foi definida como a área de drenagem a montante da estação fluviométrica da Agência Nacional das Águas, HELVÉCIA (ANA – Código 55510000). Assim a área de estudo foi definida em aproximadamente 2952 km², compreendendo 64% da área da bacia hidrográfica do rio Peruípe (Figura 1).

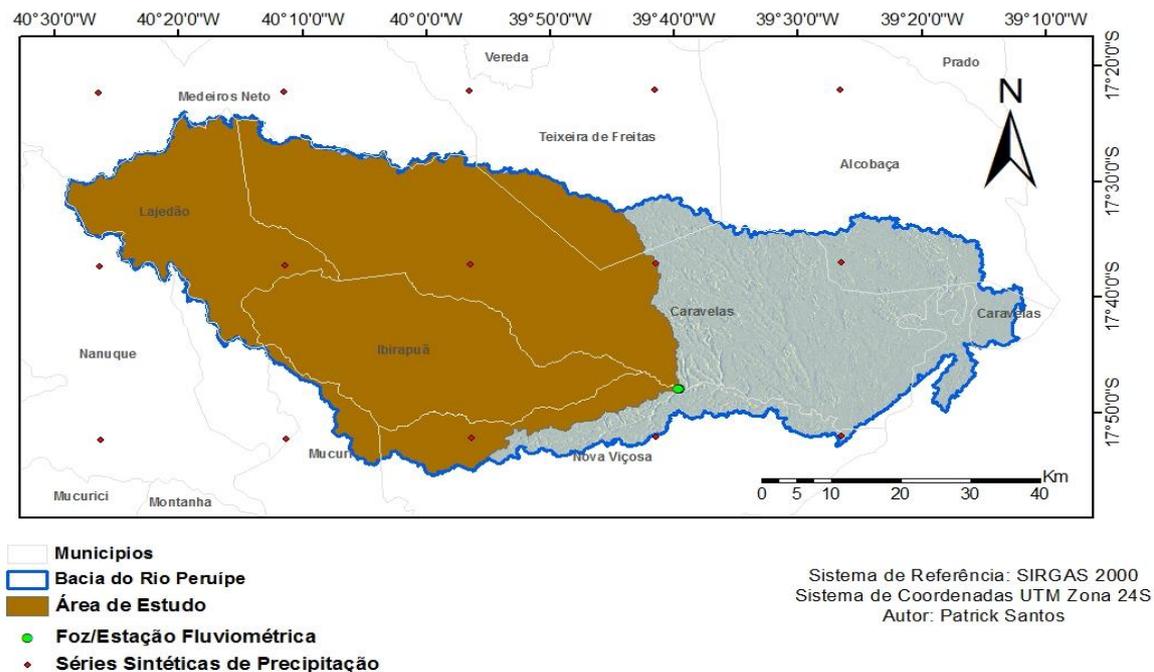


Figura 1. Área de Estudo, localização das estações sintéticas e municípios da região.

A área de estudo possui no litoral o clima tropical úmido, já no interior tropical subúmido, com cobertura vegetal de floresta ombrófila densa, sendo o domínio de Mata Atlântica. As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, com período mais intenso de chuvas entre os meses de novembro a janeiro, não havendo índices pluviométricos mensais inferiores a 60 mm. A lâmina pluviométrica média anual está em torno de 1.100mm, com temperaturas entre 23°C e 27°C (FARIAS *et al.*, 2020).

Atualmente a área é composta por sete usos do solo, sendo os mais predominantes os a utilização da área por eucalipto e pastagem, perfazendo cerca de 35% e 40% respectivamente. Os outros usos estão divididos em área urbana, cana de açúcar, água, solo exposto e mata nativa. A mata nativa compreende atualmente cerca de 6% da bacia. As áreas de uso e ocupação do solo estão descritas na Figura 2.

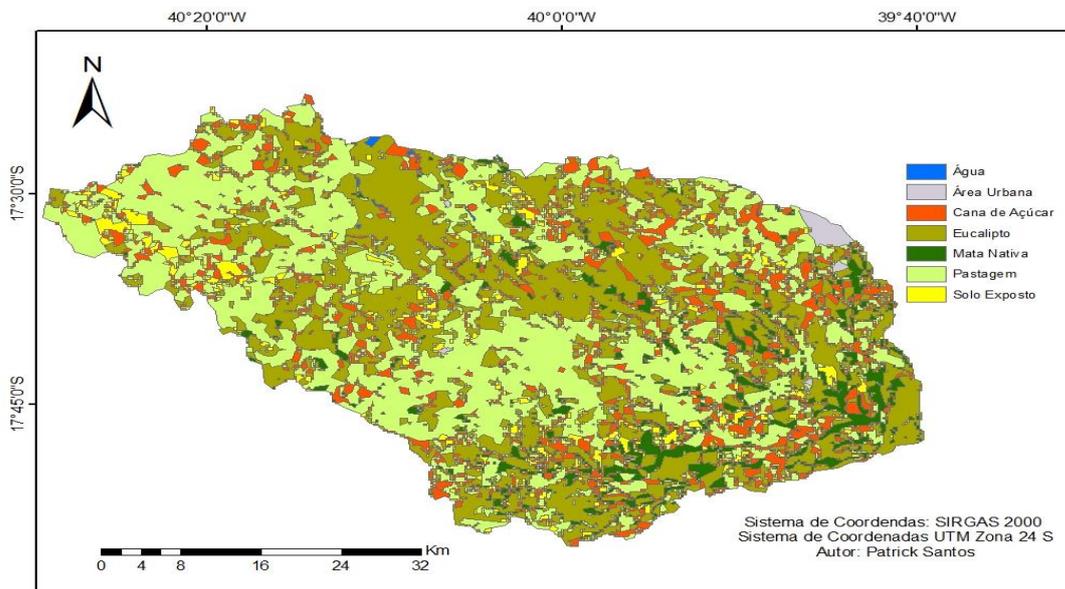


Figura 2. Mapa de Uso e Ocupação do solo.

2.2 Calibração do modelo SWAT

Para a realização deste estudo foi utilizado os parâmetros calibrados para a bacia do rio Peruípe, presentes no capítulo II desta dissertação. Na montagem do projeto foram utilizados o software SWAT (Versão 2012) integrado ao ArcGIS (ESRI - Versão 10.1). Já nas etapas de análise de sensibilidade, incerteza, calibração e validação foi utilizado o algoritmo SUFI2 implementado no software SWAT-CUP.

2.3 Cenários (Mapa dos cenários)

Modelos matemáticos de simulação ambiental têm favorecido o entendimento da dinâmica hidrológica em bacias hidrográficas, sendo valiosas ferramentas de previsão de cenários, baseados em alterações de uso e ocupação do solo (SIQUEIRA *et al.*, 2016). No presente estudo, a análise de diferentes cenários buscou compreender o real impacto sobre os recursos hídricos, causados pela crescente produção de eucalipto na bacia do rio Peruípe, em detrimento da redução do uso de pastagem. Além deste contexto, buscou-se também compreender este impacto com relação às matas nativas desta bacia, sendo estes, os motivos da escolha da cobertura do solo como objeto de transição.

O uso atual é formado por aproximadamente 35% de eucalipto e 40% de pastagem. Partindo do pressuposto que desde os anos de 1980 até os anos atuais a cultura do eucalipto vem se expandindo principalmente sobre as áreas de pastagem, neste trabalho optou-se por realizar a mudança de cenário sobre o uso e ocupação de pastagem e eucalipto, mantendo os demais usos inalterados. O cenário A é formado pelo uso atual, cenário B é formado pela substituição do eucalipto por pastagem, cenário C é formado pela substituição da pastagem por eucalipto e o cenário D é formado pela substituição do eucalipto por mata nativa. É necessário ressaltar que cenário B é justificado como sendo um cenário da década de 1980, anterior à implantação da cultura do eucalipto na região (Araújo, 2019). Com relação ao cenário C, foi adotada uma projeção de duplicação da área atual visando estimar o impacto decorrente da aplicação da cultura na região. O esquema das porcentagens em transição está disposto na Tabela 1 e Figura 3.

Tabela 1: Cenários simulados na bacia do rio Peruípe e respectivas porcentagens aproximadas de cobertura do solo

| Cenário | Descrição |
|----------------|---|
| A | Uso e ocupação do solo Atual (eucalipto + pastagem: 75% da área) |
| B | Uso e ocupação do solo com predominância de pastagem (75%). |
| C | Uso e ocupação do solo com predominância de eucalipto (75%) |
| D | Uso e ocupação do solo atual com substituição do eucalipto por mata nativa (40% de mata nativa) |

. O uso e ocupação do solo atual com substituição do eucalipto por mata nativa (D) refere-se ao cenário onde toda a área de eucalipto atual é substituída por mata nativa. Este cenário justifica-se devido aos conflitos socioambientais gerados no extremo sul da Bahia, no tocante à supressão vegetal para fins agrícolas e de reflorestamento, voltadas ao comércio.

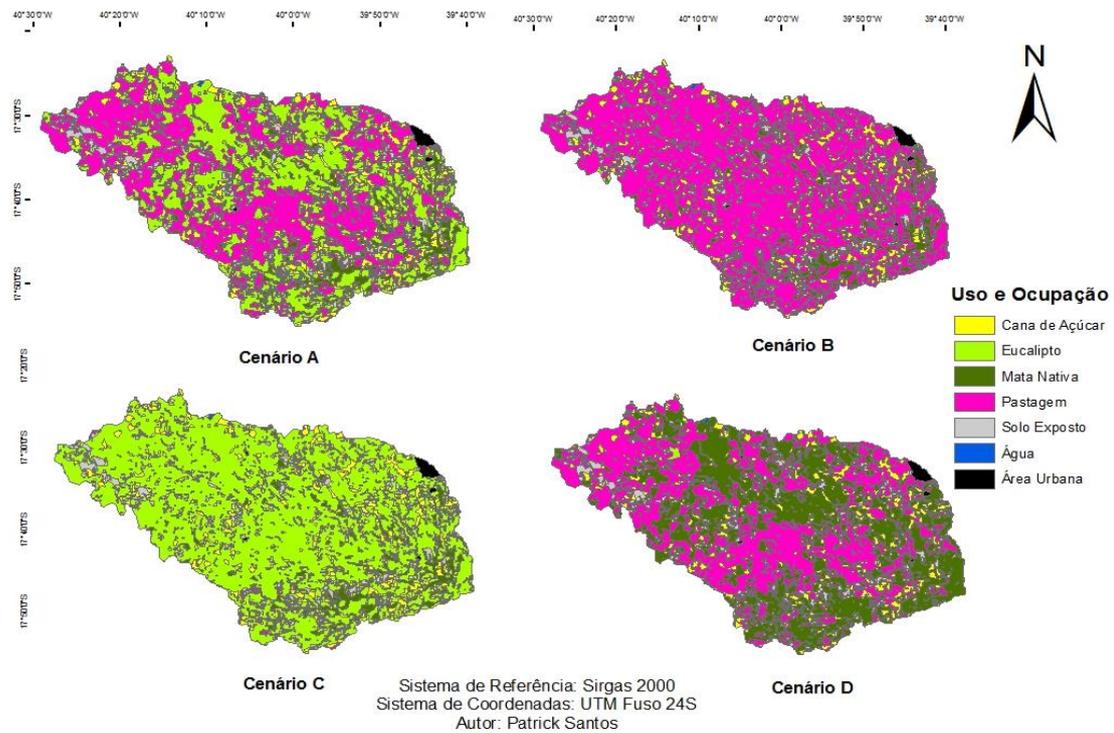


Figura 3: Quatro cenários considerados para simulação de vazões na bacia no rio Peruípe.

A dinâmica de transição entre os cenários considerados nesse trabalho é ilustrada abaixo (Figura 4).

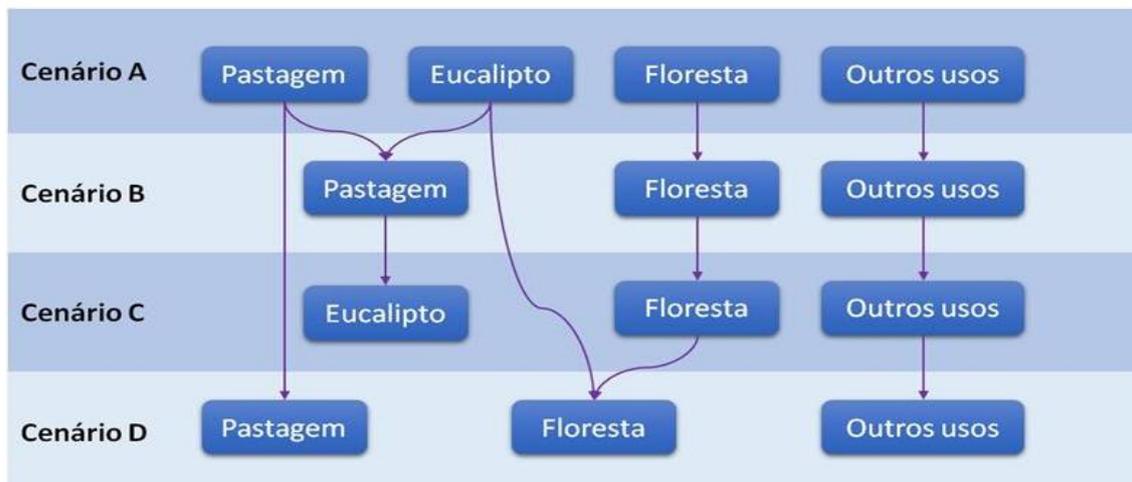


Figura 4: Cenários considerados para simulação de vazões na bacia no rio Peruípe.

2.4 Avaliações dos cenários

Na avaliação dos cenários foram observados os resultados do balanço hídrico, tomando como destaque a separação dos escoamentos de base e superficial, com o auxílio da ferramenta SWATcheck (WHITE *et al.*, 2012). Para análise das vazões mínimas, relacionada a curva de permanência de cada cenário, vazões medias de longa duração, bem como vazões máximas para distintos períodos de retorno, foi utilizado o Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAR 1.0) (SOUSA *et al.*, 2009), sendo considerado o ano hidrológico em outubro, estimou-se vazões miniminas para diferentes períodos de retorno. Foram utilizadas funções de densidade de probabilidade, tendo em vista o aproveitamento de mais de 30 anos de dados simulados, refletindo assim no método utilizado (CATALUNHA *et al.*, 2002).

3 Resultados e discussão

3.1 Avaliação dos cenários a partir da análise de componentes do balanço hídrico

Na Tabela 2 estão apresentados os dados do balaço hídrico para os cenários considerados. Nota-se na tabela que a Evapotranspiração Real (ET_R) foi maior nos cenários com maiores proporções de eucalipto e menor nos cenários com maiores áreas de pastagem. O cenário C apresentou maior lâmina evapotranspirada por possuir cerca de 75% de áreas com eucalipto. O cenário atual (Cenário A) foi o que apresentou a segunda maior ET_R superando, inclusive, o cenário com maiores áreas com vegetação nativa (Cenário D).

Tabela 2. Valores médios anuais de variáveis provenientes do balanço hídrico para os cenários estudados.

| Variável do balanço hídrico | Cenários | | | |
|---|----------|---------|--------|--------|
| | A | B | C | D |
| Precipitação (mm) | 1128.9 | 1128.9 | 1128.9 | 1128.9 |
| Evapotranspiração Real (mm) | 892.6 | 865.8 | 924.5 | 881.8 |
| Escoamento Superficial (mm) | 13.24 | 16.51 | 9.38 | 13.01 |
| Escoamento Lateral (mm) | 94.95 | 86.02 | 93.96 | 85.14 |
| Contribuição de água subterrânea para o trecho (mm) | 122.12 | 11 8.12 | 97.18 | 109.42 |
| Recarga para o aquífero profundo (mm) | 5.99 | 8.27 | 4.77 | 7.67 |

Como informado anteriormente, os cenários foram constituídos exclusivamente a partir de alteração no uso do solo, sendo os demais dados de entrada do modelo (relevo, solo e dados meteorológicos) mantidos tais como os originais. Assim, pode-se

constatar que as diferenças nos valores de ET_R obtidos se devem às características fisiológicas das plantas. De acordo com Medeiros (2002), características como área foliar, condutância estomática, resistência aerodinâmica do dossel da planta, estado fenológico e manejo, interferem diretamente nos valores de ET_R .

Os menores valores de ET_R observados para o cenário com maior proporção de pastagem (Cenário B) podem ser explicados pelas características da planta e condições fisiológicas menos favoráveis à ocorrência da ET_R com que elas se apresentam no ambiente. Tais condições fisiológicas, sobretudo o desenvolvimento da área foliar, têm tendência de ser fortemente comprometida em decorrência do manejo deficiente ou inexistente das pastagens da região, o que implica em menor desenvolvimento da parte aérea da planta e, conseqüentemente, menores valores de ET_R .

No que se refere aos resultados de escoamento superficial, observa-se que os menores valores foram obtidos para o cenário com predominância de eucalipto (Cenário C) seguido pelo cenário onde o eucalipto foi substituído por floresta (Cenário D) e uso atual (Cenário A), sendo os maiores valores observados para o cenário com predominância de pastagem (Cenário B).

Na medida em que o solo apresenta melhores condições de cobertura vegetal, menor será a propensão ao escoamento superficial. Quanto maior a cobertura vegetal, maior a interceptação da precipitação pela parte aérea da planta e melhor será a proteção do solo contra o impacto direto das gotas de chuva, fatores estes que promovem a redução da lâmina de escoamento superficial. Na bacia do rio Peruípe, foram observados valores elevados do escoamento superficial nos cenários B (16.51 mm) comparado aos demais, conforme a Tabela 2. O aumento do escoamento superficial no cenário B justifica-se pelo predomínio da pastagem, além de ser potencializada pelo tipo de pastagem aplicada nesta modelagem, adotando-se um dos três critérios estudado por Andrade *et al.* (2010), o qual o índice de área foliar (IAF) próximo a 2 foi admitido, pastagem com degradação intermediária. De acordo com esse critério, Andrade *et al.* (2010) destacam que a altura média de pastagem com degradação intermediária varia de 13,8 a 31,4 cm. Esta condição da pastagem, comparado aos demais usos, explica o aumento do escoamento superficial em áreas de pastagens da bacia do rio Peruípe.

Ainda em relação ao escoamento superficial, foi observada relação inversa entre os dados quando comparados aos dados de evapotranspiração. Essa relação já era esperada, visto que quanto maior a retirada de água do solo pelas plantas por meio da evapotranspiração, menor será o teor de água no solo e menores serão os valores do

potencial matricial da água no solo e, conseqüentemente, maiores taxas de infiltração da água no solo. Quanto maior a lâmina infiltrada menor será a lâmina de escoamento superficial.

Com relação ao escoamento subterrâneo, que no SWAT é modelado por meio dos componentes Escoamento Lateral e Contribuição de Água Subterrânea para o Trecho (Tabela 2), foi possível constatar as menores lâminas de escoamento subterrâneo para os cenários C e D, compostos, respectivamente, por áreas predominantemente com eucalipto e com ampliação de áreas florestais. Culturas como o eucalipto e espécies arbóreas de grande porte características de mata atlântica, tendem a explorar um volume maior do solo e, conseqüentemente, absorver (retirar) maior quantidade de água do solo implicando, assim, em uma quantidade maior de água que ficará retida no solo antes de atingir a capacidade de campo (capacidade máxima de armazenamento de água no solo). Dessa forma, considerando que haverá escoamento subterrâneo a partir do instante em que a capacidade de campo for excedida, menor será a lâmina de escoamento superficial.

3.2 Vazões Mínimas

3.2.1 Curvas de Permanência

Para as vazões mínimas com diferentes permanências na série (Tabela 3), constatou-se, por meio dos resultados simulados, redução nas vazões mínimas apenas para o cenário C, em relação ao A. Esse comportamento pode ser explicado pelo da cultura do eucalipto apresentar maior evapotranspiração frente às demais culturas, como também já mostrado na Tabela 2. Deve-se destacar o cenário B, que considera predominância de pastagem, como sendo o maior aumento das vazões mínimas, chegando a um aumento de mais de 8% para uma permanência de 70% das vazões frente ao cenário A. Deve-se também observar o cenário D, pois apesar de sua predominância por mata nativa em 40% da área, houve redução das vazões mínimas até 50% das vazões de permanência, para maiores permanências foi possível observar aumento das vazões mínimas, em relação ao cenário A.

Tabela 3: Vazões de permanência para os cenários simulados.

| Vazões de Permanência (%) | Cenário A | | Cenário B | | Cenário C | | Cenário D | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| | Vazão (m ³ /s) | Vazão (m ³ /s) | Variação em relação ao cenário A (%) | Vazão (m ³ /s) | Variação em relação ao cenário A (%) | Vazão (m ³ /s) | Variação em relação ao cenário A (%) | |
| 95 | 5.56 | 5.67 | 1.83 | 5.02 | -9.72 | 5.69 | 2.28 | |
| 90 | 6.71 | 7.03 | 4.85 | 5.98 | -10.81 | 6.97 | 3.85 | |
| 85 | 7.65 | 8.14 | 6.45 | 6.67 | -12.78 | 7.94 | 3.80 | |
| 80 | 8.61 | 9.17 | 6.55 | 7.36 | -14.55 | 8.89 | 3.23 | |
| 75 | 9.54 | 10.25 | 7.38 | 8.10 | -15.12 | 9.83 | 2.94 | |
| 70 | 10.52 | 11.38 | 8.12 | 8.88 | -15.61 | 10.76 | 2.28 | |
| 65 | 11.59 | 12.51 | 7.90 | 9.70 | -16.31 | 11.76 | 1.50 | |
| 60 | 12.63 | 13.59 | 7.62 | 10.58 | -16.20 | 12.78 | 1.21 | |
| 55 | 13.78 | 14.76 | 7.11 | 11.54 | -16.20 | 13.85 | 0.55 | |
| 50 | 15.06 | 15.98 | 6.05 | 12.63 | -16.17 | 14.97 | -0.61 | |

Para melhor visualização dos resultados, a análise gráfica das curvas de permanência (Figura 5) auxilia em outras verificações. Para esta pesquisa, considerando como referência o cenário A, que reflete as condições atuais da bacia do rio Peruípe, nota-se que os resultados simulados para o cenário C possuem as menores vazões mínimas em todo tempo da série histórica. Este fenômeno mostrado pela curva de permanência com relação a cultura do eucalipto, reflete o comportamento da mesma ao evapotranspirar grandes lâminas de água (Figura 5). Ainda de acordo com a análise gráfica, as vazões mínimas dos cenários B e C se aproximam do Cenário A. Esse comportamento de redução das vazões mínimas na bacia do rio Peruípe foi previsto por Araújo (2019) as vazões da mesma.

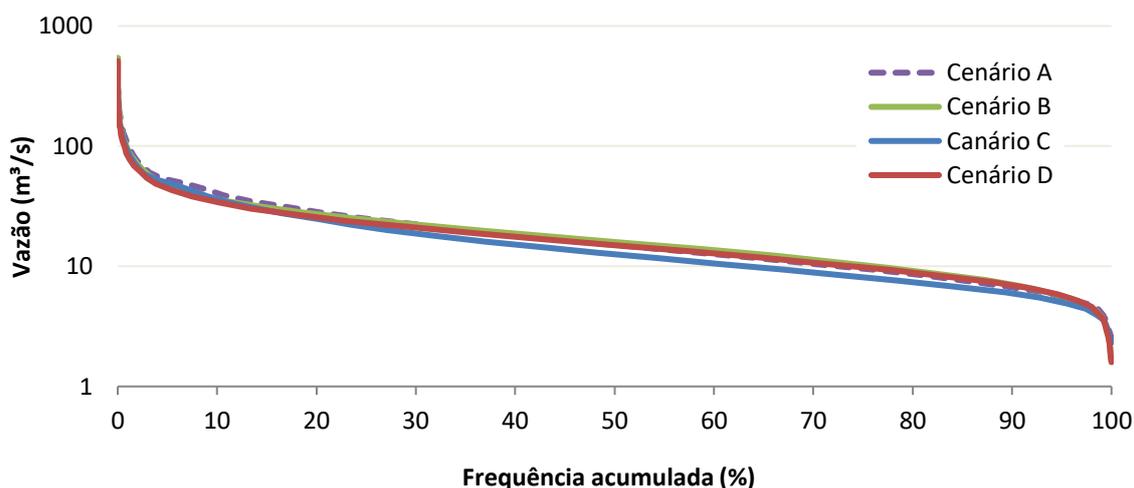


Figura 5. Curvas de permanência das vazões simuladas nos cenários A (uso e ocupação do solo atual), B (uso e ocupação do solo com predominância de 75% de pastagem), C (uso e ocupação do solo com predominância de 75% de eucalipto) e D (uso e ocupação do solo atual com substituição de eucalipto por mata nativa).

Esta configuração do cenário C, representando a duplicação das áreas de eucalipto, traduz que esta cultura é capaz de reduzir as vazões desta bacia de forma mais acentuada do que a própria pastagem ou a mata nativa. Araujo (2019) descreve que o cenário atual, comparado ao cenário B, o qual representa um cenário de 1989 da bacia do rio Peruípe, reduziu as vazões mínimas, médias e máximas com a presença do eucalipto. Por outro lado, o cenário C, de acordo com o exposto no balanço hídrico, foi capaz de reduzir o escoamento superficial, tendo um decréscimo de aproximadamente 30% em relação ao cenário A.

3.3 Vazões médias

O estudo da vazão média é importante, pois ela representa a disponibilidade hídrica máxima em uma bacia. A vazão média é a maior vazão que pode ser regularizada, permitindo a avaliação dos limites superiores do uso da água de um manancial para as diferentes finalidades (TUCCI, 2002). Dessa forma, a vazão média de longa duração é formada pela média das vazões médias anuais da série histórica existente para determinado rio, este valor é adotado como a maior vazão possível de ser regularizada no curso d'água (PRUSKI *et al.*, 2006).

Para os cenários simulados, os valores encontrados para vazões médias de longa duração estão expressos na Tabela 4. Neste aspecto, a comparação entre todos os

cenários com relação ao atual, a maior vazão de longa duração destacou-se no cenário B. O cenário A, apesar de mostrar-se com a maior vazão média de longa duração, observou-se através do balanço hídrico que esse aumento não foi motivado predominantemente pelo escoamento superficial. Adotou-se para este estudo em áreas ocupadas por eucalipto valores de CN correspondente a 36 em solos do tipo latossolo e 60 para solos do tipo argissolo, enquanto para áreas ocupadas por pastagens os valores de CN foram de 49 para solos do tipo latossolos e 69 para solos do tipo argissolos, sendo ambos ajustados para uma redução de aproximadamente 49%. Dessa forma, percebe-se que o ajuste do modelo deu-se na direção de maior infiltração, mesmo em solos de pastagens.

Por outro lado, segundo o balanço hídrico destacado na Tabela 2, é possível perceber maiores contribuições de água subterrânea para o canal principal, justificando o aumento das vazões média de longa duração para o cenário A, uma vez de que se trata de vazão média anual.

Tabela 4: Vazões médias de longa duração simuladas nos Cenários A, B, C e D.

| Vazão media de Longa Duração (m ³ /s) | Cenário A | Cenário B | Cenário C | Cenário D |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 20.88 | 20.40 | 18.13 | 19.13 |

Cenário A: uso e ocupação do solo atual; **Cenário B:** uso e ocupação do solo atual, com 75% da área de pastagem; **Cenário C:** uso e ocupação do solo atual, com 75% da área de eucalipto; **Cenário D:** uso e ocupação do solo atual, com 75% da área de pastagem.

Com relação ao cenário ao cenário C e D, o cenário B, com expansão de pastagem, demonstra aumento nas vazões médias de longa duração, justamente pela retirada do eucalipto, o qual favorecia grandes volumes de água evapotranspirada. Já o cenário C, quando a predominância dessa área é de eucalipto a vazão média de longa duração diminuiu 20,76%, demonstrando então a redução de vazões médias proporcionado pela cultura do eucalipto. De acordo com Valverde (2007), o eucalipto, por ser uma espécie de rápido crescimento, apresenta um gasto energético muito alto e daí a necessidade de se hidratar, mas pode-se garantir que dificilmente outra espécie seria tão eficiente no uso deste recurso quanto ele, ou seja, justifica a redução nas vazões médias de longa duração, principalmente quando comparado ao cenário D, florestada por mata nativa.

3.4 Vazões médias Anuais

Com relação às vazões médias anuais, os resultados simulados apontam no cenário B, onde a predominância é de pastagem, superou as demais vazões nos anos de 1982 a 1985 e em 1991 (Figura 6). Nos demais anos o cenário B ocupou posições próximas aos cenários com maiores vazões médios anuais. Como já mostrado no balanço hídrico essa elevada vazão no cenário B está relacionada com a predominância da pastagem, principalmente pelas condições adotadas neste trabalho, pastagem com índice de área foliar igual a 2. O cenário A (com predominância de eucalipto e pastagem) apesar de possuir uma vazão média de longa duração muito próxima ao cenário B, observa-se que a mesma não obteve em todos os anos a as maiores vazões, corroborando que tal resultado está relacionado ao aumento da infiltração no mesmo, consequentemente maiores laminas de águas subterrânea sendo drenada para o canal do rio.

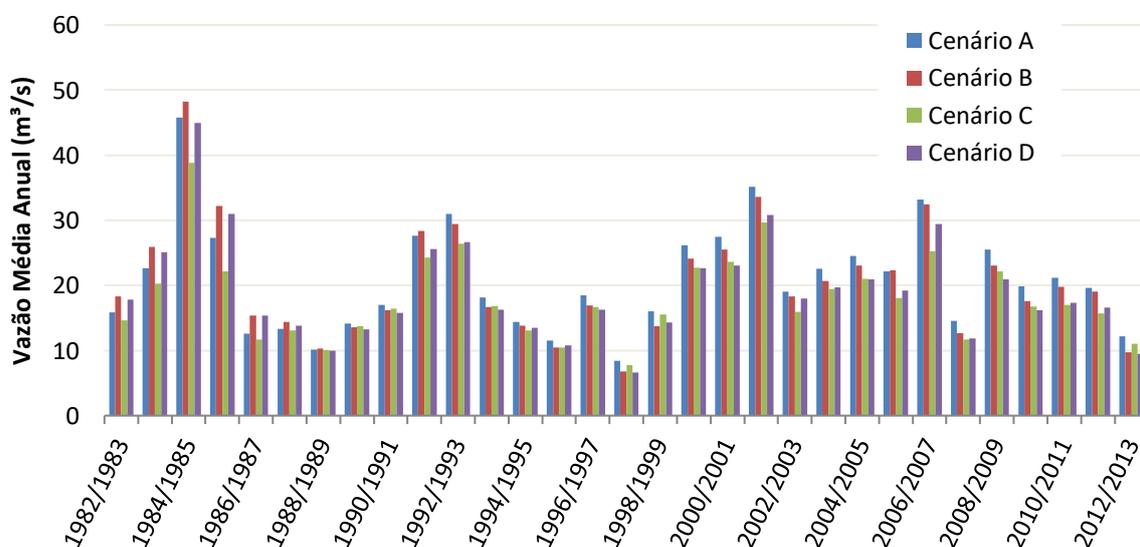


Figura 6. Vazões médias anuais simuladas para os cenários A (uso e ocupação do solo atual), B (uso e ocupação do solo atual, com substituição das áreas de eucalipto por pastagem), C (uso e ocupação do solo atual, com substituição da área de pastagem por eucalipto) e D (uso e ocupação do solo atual, com substituição da área de eucalipto por mata nativa).

Com relação ao cenário C, é possível observar maiores regularidades nas vazões, mesmo nos anos de estiagem, por exemplo, nos anos de 1987, 1988, 1990, 1993 e 1995 este cenário destacou vazões iguais ou superiores ao cenário D, o qual predomina pastagem e mata nativa, nos anos de 1989, 1990 e 1993 foi possível ainda observar que o cenário C igualou ou superou o cenário B o qual predomina a pastagem. Dessa forma, com relação aos anos de maiores precipitações é possível observar que o cenário C

mantém tal regularidade quando em todos os anos não apresenta o maior pico de vazão, por exemplo, os anos de 1984, 1985, 1991, 1992, 2001 e 2006.

O cenário D demonstrou valores de vazão abaixo do cenário B, nos anos de maiores precipitações, como mostrado, por exemplo, nos anos de 1984, 1985, 1991 e 1992. Assim também como demonstrou-se vazões regulares em anos de estiagem, por exemplo, nos anos de 1986, 1987, 1988 e 1995, isso é justificado pela presença de mata nativa, apesar de haver maior evapotranspiração em relação ao cenário B, o que justifica menores picos de vazões em períodos de maiores chuvas.

3.5 Vazões médias Mensais

Ao examinar as vazões médias mensais simuladas (Figura 7), nota-se que para todos os meses os valores do cenário A são elevados, sendo superiores nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, setembro, outubro e novembro. Nos meses mais chuvosos a média mensal das vazões foi maior para o cenário A, uma vez que, apesar do alto escoamento superficial proporcionado pela pastagem, a mesma proporciona também maiores percolações comparado a cultura do eucalipto. Deve-se ressaltar que, além da maior contribuição subterrânea para o canal, outro fator que contribui para que a média mensal do Cenário A seja superior na maioria dos meses comparado ao cenário B está relacionado ao tempo de escoamento lateral ajustado na calibração através do parâmetro LAT_TTIME (Capítulo II), o qual pôde ser ajustado no modelo, de forma global, para aproximadamente 15 dias, justificando aumento das vazões no canal em menos de um mês, ou seja, as vazões médias mensais foram potencializadas uma vez que foi ajustado o tempo do escoamento lateral.

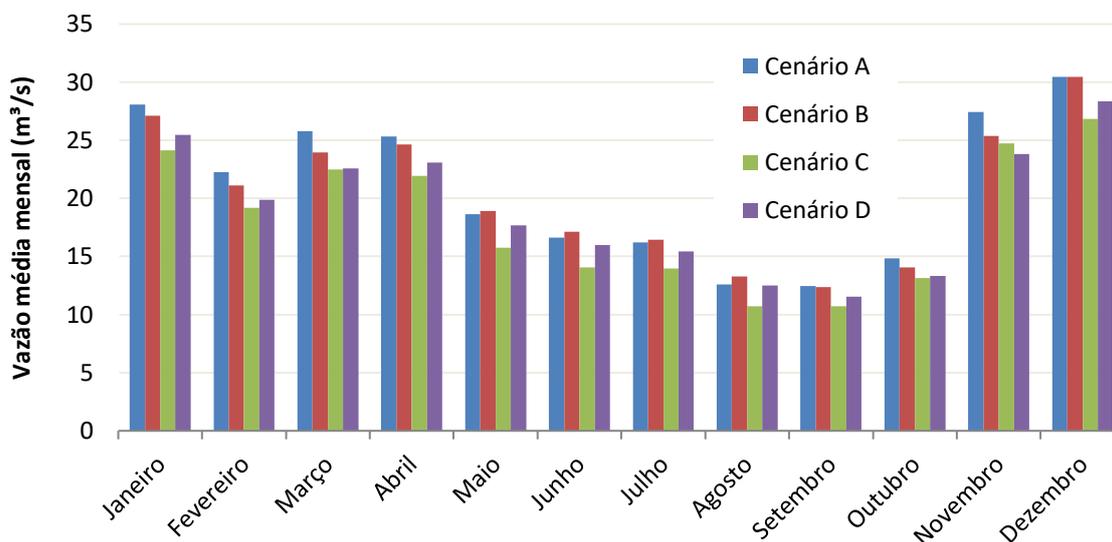


Figura 7. Vazões médias mensais simuladas para os cenários A (uso e ocupação do solo atual), B (uso e ocupação do solo atual, com substituição das áreas de eucalipto por pastagem), C (uso e ocupação do solo atual, com substituição da área de pastagem por eucalipto) e D (uso e ocupação do solo atual, com substituição da área de eucalipto por mata nativa).

Os elevados valores de vazões disposto no cenário B, chegando a ser superiores aos demais nos meses de maio, junho, julho e agosto, estão relacionados com a predominância da pastagem, em 75% da área. Esse fato corrobora com as vazões médias anuais, as quais informam que com maiores áreas destinadas para áreas de pastagem, haverá elevação das vazões, neste caso das vazões médias, destacando maiores contribuições por escoamento superficial. Haverá também grandes contribuições do fluxo de base para o leito, uma vez que há baixa perda de água por evapotranspiração e elevada contribuição subterrânea por percolação, comparado aos demais cenários. Esta tendência do cenário B nos informa que há maiores chances de eventos de cheias frente aos demais cenários. Por outro lado, em meses de menores pluviosidades, o cenário B ainda consegue manter uma vazão considerável, reafirmando a alta contribuição subterrânea para o canal.

Deve-se ressaltar também que as vazões médias mensais para o cenário C, respectivamente, manteve-se em onze dos doze meses o esperado, redução das vazões médias comparados aos demais cenários. As vazões médias foram reduzidas no cenário C, sendo esse comportamento esperado, uma vez que a cultura do eucalipto possui grande evapotranspiração frente às demais culturas. Araújo (2019) previu o mesmo comportamento na bacia do rio Peruípe, quando percebeu que a cultura do eucalipto

proporcionou a redução das vazões médias em um cenário atual de 2014, comparado a um cenário de 1989 (cenário B). Araújo observou que a redução da vazão média foi de 28,22% nesse período.

O cenário D, comparado ao cenário A, onde ambos são constituídos de 40% da área de pastagem, possui maior tendência à redução das vazões médias. De acordo com o balanço hídrico (Tabela 2), justifica-se esse fato pela maior lâmina de percolação do cenário D frente ao cenário A, logicamente proporcionado pela mata nativa, divergindo do comportamento do eucalipto. Nas áreas de eucalipto a infiltração da água não foi totalmente convertido em escoamento subterrâneo para o curso d'água, e sim retornado como evapotranspiração através do própria cultura, justificando essa diferença entre as vazões médias mensais.

Como mostrado na tabela 2, apesar do escoamento superficial no terreno de pastagem ser maior em relação aos demais cultivos, a infiltração e percolação da água é mais efetiva no terreno do mesmo, esse fenômeno é possível por estar sendo comparado culturas (eucalipto e mata nativa) com alto índice de evapotranspiração frente a pastagem, conseqüentemente a lâmina de água evapotranspirada no cenário B é menor dos 4 cenários, porém ainda no cenário B há a maior lamina d'água por percolação.

3.6 Vazões Máximas

A estimativa das vazões máximas é grande relevância na determinação dos custos e da segurança dos projetos de engenharia, dando suporte para a aplicação de medidas de ordem estrutural e não estrutural visando o controle e atenuação das cheias (TUCCI *et al.*, 2004).

Neste trabalho considerou-se vazões máximas para a discussão de picos de cheias. Com o auxílio do *software* SisCAH 1.0, foram estimadas as vazões máximas para os quatro cenários simulados na Bacia Hidrográfica do rio Peruípe, considerando cinco períodos de retorno: 10, 25 e 50, 100 e 1000 anos. A distribuição estatística que retornou menor amplitude do intervalo de confiança, com um nível de probabilidade de 95%, foi a Logpearson 3, exceto para o período de retorno de 10 anos no cenário C, o qual considerou a distribuição de Gumbel.

Tabela 4: Vazões máximas ajustadas para diferentes tempos de retorno, para os quatro cenários simulados

| Período de Retorno (anos) | Vazão Máximo (m ³ /s) | | | |
|---------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Cenário A | Cenário B | Cenário C | Cenário D |
| 10 | 344.23** | 326.51** | 250.48* | 298.48** |
| 25 | 440.65** | 424.39** | 356.30** | 389.10** |
| 50 | 512.18** | 496.99** | 412.57** | 456.32** |
| 100 | 583.19** | 569.07** | 468.43** | 523.05** |
| 1000 | 817,81** | 807.22** | 652.96** | 743.55** |

* distribuição estatística que retornou menor amplitude do intervalo de confiança, Logpearson 3.

** distribuição estatística que retornou menor amplitude do intervalo de confiança, Gumbel.

De acordo com os resultados descritos na tabela 4, os maiores eventos de cheias ocorrem principalmente nos cenários com presença de pastagem, devendo destacar o cenário B, o qual há predominância da pastagem. Por outro lado, o maior amortecimento das cheias ocorreu no cenário C, o qual com a maior predominância de eucalipto. Araújo (2019) descreve que entre os períodos de 1989 (cenário B) e 2014 (cenário A), a vazão média anual variou apenas 0,33%, sendo descrito como semelhantes. É possível observar essa semelhança entre os cenários A e B, quando comparados as vazões de retorno. Em sequência o cenário que oferece maiores amortecimentos nos picos de vazões é o cenário o qual há a predominância de 40% dá área por mata nativa. Esses resultados no amortecimento das vazões são justificados pela presença de espécies que potencializam a ET_R na bacia.

4 Conclusão

A partir da análise das vazões simuladas, constatou-se redução nas vazões médias e mínimas no cenário que considera a expansão da cultura do eucalipto na bacia do rio Peruípe. Destaca-se ainda que foram observadas reduções nas vazões médias e mínimas no cenário com substituição do eucalipto por mata nativa.

Os resultados obtidos indicam que o uso do solo com pastagem oferece impactos potenciais a esta bacia, relacionados ao aumento do escoamento superficial. Por outro lado, os cenários com predominância de pastagem (Cenário B) não sofreram impactos negativos no regime de vazões médias e mínimas, frente ao cenário com predominância de eucalipto (Cenário C), indicando contribuições subterrâneas significativas para abastecer o leito do rio em ambos os períodos, chuvas e estiagem. Em termos

quantitativos, relacionado à vazão de referência Q_{90} , o cenário B sofreu um aumento de 4,85%, o cenário C sofreu uma redução de 10,81% e o cenário D um aumento de 3,85%.

Os picos de vazões máximas foram reduzidos com a expansão do eucalipto em aproximadamente 20% para todos os períodos de retorno testado. Essa redução nas vazões máximas em áreas com predominâncias de eucalipto destaca a relevância do processo de evapotranspiração proporcionado pelo eucalipto, sendo capaz de transferir para atmosfera uma lâmina igual ou superior a 20% de toda a água que entra no sistema.

5 Referências

ALMEIDA, T. M., MOREAU, A. M. S. S., MOREAU, M. S., PIRES, M. M., FONTES, E. O., GÓES, L. M. Reorganização socioeconômica no extremo sul da Bahia decorrente da introdução da cultura do eucalipto. **Sociedade & Natureza**, v. 20, n. 2, p. 5-18, 2008.

ALVES, L. F. INFLUÊNCIA DE RESERVATÓRIOS DE REGULARIZAÇÃO NO REGIME DE VAZÕES DA BACIA DO RIO CATOLÉ GRANDE. 2018.

ARAÚJO, K. P. B. INFLUÊNCIA DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PERUÍPE – BA. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Bahia. p. 12. 2019.

ANDRADE, C. W. L., MONTENEGRO, S. M. G. L., LIMA, J. R. S., MONTENEGRO, A. A. A., SRINIVASAN, R. DE. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da região Nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 440-453, 2017.

ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, M. J., SRINIVASAN, R., SANTHI, C. Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

FARIAS, E. S., Silva, G. M. F., SILVA, J. B. L., SILVA, D. P., PIRES L. C. Caracterização hidrológica das bacias hidrográficas dos rios Peruípe, Itanhém e Jucuruçu. **Scientia Plena**, v. 16, n. 8, 2020.

MEDEIROS, A. T. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE. 2002. 120p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola

Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

NEITSCH, S. L, ARNOLD, J. G, J.R. Kiniry, WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da; KOETZ, M. Estudo de vazão em cursos d'água. Viçosa: AEAGRI (Série Caderno Didático nº 43), p. 151, 2006.

SANTOS, M. S., FRANCO, G. B., LOPES, N. S., PINHEIRO, M. A., MOREAU, A. M. S. S., ANDRADE, A. C. S., MOREAU, M. S. BACIA DO RIO PERUÍPE (EXTREMO SUL DA BAHIA): ASPECTOS FÍSICOS E SÓCIO-ECONÔMICOS. UFSM - RS, 02 a 07 de Agosto de 2004.

SARMENTO-SOARES, L. M. S., MAZZONI, R., PINHEIRO, R. F. M. A fauna de peixes na bacia do Rio Peruípe, extremo Sul da Bahia. **Biota Neotropica**, v. 7, n. 3, p. 291-308, 2007.

SETTI, A. A. Lima, J. E. F. W. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2001.

SOUZA, S.O; VALE, C. C; NASCIMENTO. Bacia do rio peruípe (ba): ensaio de classificação morfométrica por meio de dados SRTM, **Revista on-line Caminhos da Geografia, Uberlandia**, v. 14, n. 47, p. 208–222, set. 2013.

SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECON, P. R.; SOUZA, J. R. C. SisCAH 1.0: Sistema computacional para análises hidrológicas. Brasília: Agência Nacional de Águas, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 60p

TADEU, N. D. **Avaliação dos impactos hídricos da monocultura de eucalipto no trecho paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (Brasil). 2014. 176 f.** Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental)–Universidade de São Paulo, São Paulo.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação, 3ª ed. Porto Alegre, UFRGS, ABRH, 2004.

WHITE, MICHAEL & DAREN HARMEL, R & ARNOLD, JEFF & R WILLIAMS, JIMMY. (2012). SWAT Check: A Screening Tool to Assist Users in the Identification of Potential Model Application Problems. *Journal of environmental quality*. 43. 10.2134/jeq2012.0039.