

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Produção de Água na Bacia Hidrográfica do Rio Catolé Grande
Utilizando o Modelo Hidrológico SWAT

Jhones da Silva Amorim

Itapetinga
Bahia
Março - 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Produção de Água na Bacia Hidrográfica do Rio Catolé Grande
Utilizando o Modelo Hidrológico SWAT

Autor: Jhones da Silva Amorim
Orientadora: Prof.^a D.Sc. Flávia Mariani Barros
Co-orientadores: Prof. D.Sc. Danilo Paulucio da Silva
Prof. D.Sc. Felizardo Adenílson Rocha

“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
Bahia
Março - 2016

628.161 Amorim, Jhones da Silva.
A543p Produção de água na Bacia Hidrográfica do Rio Catolé Grande utilizando o modelo hidrológico SWAT. / Jhones da Silva Amorim. – Itapetinga-BA: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2016.

82 fl.

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Campus de Itapetinga, BA. Área de Concentração em Meio Ambiente e Desenvolvimento. Sob a orientação da Prof^a. D. Sc. Flávia Mariani Barros; co-orientadores Prof. D. Sc. Danilo Paulúcio da Silva; Prof. D. Sc. Felizardo Adenilson Rocha.

1. Água – Produção – Bacia Hidrográfica – Rio Catolé Grande, Ba. 2. Produção de água – Modelagem hidrológica – *Soiland Water Assessment Tool* (SWAT). I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. II. Barros, Flávia Mariani. III. Silva, Danilo Paulucio da. IV. Rocha, Felizardo Adenilson. V. Título.

CDD(21): 628.161

Catálogo na fonte:

Cláudia Aparecida de Souza – CRB/5-1014
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para Desdobramento por Assunto:

1. Água : Produção
2. Bacia Hidrográfica : Rio Catolé Grande, Ba
3. Modelagem hidrológica
4. *Soiland Water Assessment Tool* (SWAT)

"Eu sou a videira; vocês são os ramos. Se alguém permanecer em mim e eu nele, esse dará muitos frutos; pois sem mim vocês não podem fazer coisa alguma."

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela infinita bondade e por me proporcionar um momento como esse, enchendo de confiança e força para não desistir diante dos obstáculos.

Ao meu pai, Josevalto Amorim Nascimento, por ser um dos principais alicerces de toda formação como homem e profissional, minha mãe Norma Pereira da Silva, pelo amor e afeto dedicado a mim.

Minha irmã, Jamille da Silva Amorim, pela fraternidade e compartilhamento de momentos bons e ruins.

A Prof.^a Dr.^a Flávia Mariani Barros pela orientação, dedicação, ensinamentos compartilhados, tranquilidade que passa e sobretudo por acreditar em mim sendo mentora desde as iniciações científicas.

Ao Prof.^o Dr.^o Danilo Paulucio da Silva pela co-orientação, canetadas vermelhas, paciência, pelos incentivos e sobre tudo amizade e conselhos não apenas na academia mas na vida pessoal.

Ao co-orientador Prof.^o Dr.^o Felizardo Adenilson Rocha por ter sido fundamental no desenvolvimento deste trabalho, pela amizade, dedicação e disponibilidade em ensinar e todo conhecimento passado durante esse período.

A minha namorada Nicole, pelo carinho e companheirismo. A equipe de pesquisa em dispersão de poluentes, em especial ao grande amigo Stenio, pela amizade e fraternidade durante os cafezinhos. Agradeço também a Micael, Luciano e Mayana pelos conselhos e auxílios. A Devson e Laurine eternos irmãos.

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia principal formadora deste profissional desde a graduação e pelo espaço disponibilizado para a realização dos trabalhos.

A Fundação de Amparo a Pesquisada Bahia – FAPESB pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento deste projeto.

BIOGRAFIA

JHONES DA SILVA AMORIM, filho de Josevalto Amorim Nascimento e Norma Pereira da Silva, nasceu em 14 de Janeiro de 1991, em Itapetinga, estado da Bahia.

Em Fevereiro de 2005 ingressou na Escola Média de Agropecuária Regional da Ceplac EMARC- de Itapetinga, onde obteve a formação de Técnico em Agropecuária, em Dezembro de 2007.

No primeiro semestre de 2008, ingressou na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, concluindo o curso de graduação em Engenharia Ambiental, em Outubro de 2013.

Em Setembro de 2013, iniciou curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho na Faculdade de Tecnologia e Ciências, em Vitória da Conquista concluindo em Março de 2015.

Iniciou em Março de 2014 o Mestrado em Ciências Ambientais na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, submetendo-se a defesa de dissertação em Março de 2016.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Bacia Hidrográfica e o ciclo Hidrológico	5
3.2 Modelagem Hidrológica	8
3.3 O modelo SWAT	10
3.3.1 A evapotranspiração no modelo SWAT	13
3.3.2 Escoamento superficial	15
3.3.3 Escoamento lateral (escoamento subsuperficial)	17
3.3.3 Escoamento subterrâneo.....	17
3.3.4 Estudos utilizando o modelo SWAT.....	20
3.4 Análise de sensibilidade do modelo.....	21
3.5 Calibração e validação	23
3.6 Produção de água	25
4.0 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 Caracterização da área de estudo	27
4.2 Dados de entrada para o modelo SWAT.....	28
4.2.1 Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente - MDEHC	28
4.2.2 Classes de solo da área de estudo.....	29

4.2.3	Uso e ocupação do solo do da área de estudo	31
4.2.4	Séries históricas de dados meteorológicos e vazão.....	32
4.3	Entrada de dados no ArcSwat	34
4.4	Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo	35
4.4.1	Análise de sensibilidade	35
4.4.2	Calibração e validação	36
4.5	Análise de desempenho do modelo SWAT	38
4.4	Análise da produção de água na bacia hidrográfica do Catolé Grande.....	40
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Análise de sensibilidade	41
5.2	Calibração, validação e avaliação do modelo	44
5.3	Produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande	50
6.0	CONCLUSÃO	58
7.0	RECOMENDAÇÕES	59
8.0	REFERÊNCIAS	60

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Classes de declividade usada na simulação com o modelo SWAT	35
Tabela 2: Classificação de sensibilidade dos parâmetros	36
Tabela 3: Relação dos parâmetros passíveis de calibração no SWAT e suas respectivas faixas de alteração.....	37
Tabela 4: Classificação do modelo conforme valores dos coeficientes estatísticos	39
Tabela 5: Valores dos parâmetros obtidos na calibração automática	45
Tabela 6: Resultado das estatísticas para os períodos de calibração e validação.....	46
Tabela 7: Vazões médias simuladas e observadas	47
Tabela 8: Análise de variância para a produção de água nas Sub-bacias	50
Tabela 9: Resultado do teste t a 5% de probabilidade para produção de água anual.....	51
Tabela 10: Valores percentais de classes de solo, declividade e uso do solo para cada uma das sete sub-bacias estudadas.....	53
Tabela 11: Resultado do teste t a 5% de probabilidade para armazenamento de água no solo.....	54

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Processos que formam o ciclo hidrológico. (Fonte: USGS,2015).....	7
Figura 2: Modelos que fizeram parte do desenvolvimento do SWAT. Fonte: Grassman et al. (2007).....	11
Figura 3:Mapa da localização geográfica da área de estudo.....	28
Figura 4: Mapa de elevação da área de estudo.....	29
Figura 5: Mapa de tipo de solo da área de estudo.	30
Figura 6: Mapa de uso de solo na área de estudo.....	31
Figura 7:Localização das estações meteorológicas utilizadas para modelagem.	32
Figura 8:Precipitação total anual para o período observado.	33
Figura 9:Análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT.....	41
Figura 10: Hidrograma das vazões simuladas e observadas e hietograma para período de calibração.	48
Figura 11: Hidrograma das vazões simuladas e observadas e hietograma para período de validação.	48
Figura 12: Produção de água para cada sub-bacia.	51
Figura 13:Armazenamento de água no solo para sub-bacias.	52
Figura 14: Escoamento superficial para cada sub-bacia.	55
Figura 15: Escoamento lateral para cada sub-bacia.	56
Figura 16: Evapotranspiração para cada sub-bacia.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS

- $a_{q_{sh,i}}$ - Quantidade de água armazenada no aquífero em um dia qualquer i (mm)
 $a_{q_{sh,i-1}}$ - Quantidade de água armazenada no aquífero em um dia $i-1$ (mm)
 $a_{q_{shthn,q}}$ - Valor limite do nível de água no aquífero para que ocorro fluxo de base (mm)
 AWC_{ly} - Capacidade de água disponível na camada do solo (adimensional)
 C_p - Calor específico a temperatura constante ($MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
 E_0 - Evapotranspiração potencial ($mm\ dia^{-1}$)
 $E_{a(i)}$ - Lâmina de água evapotranspirada
 $e_s - e_a$ - Déficit de pressão do vapor do ar (kPa)
 H_{net} - Radiação ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)
 H_0 - Radiação extraterrestre ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)
 I_t - Infiltração acumulada no tempo (mm)
 k_e - Condutividade hidráulica efetiva do solo ($mm\ hr^{-1}$)
 K_{sat} - Condutividade hidráulica do solo saturado ($mm\ h^{-1}$)
 $Q_{gw(i)}$ - Parcela da vazão no canal oriunda do escoamento subsuperficial (mm)
 $Q_{gw,i}$ - Fluxo de base contribuindo no canal no dia qualquer i (mm)
 $Q_{gw,i-1}$ - Fluxo de base no canal principal no dia i -(mm)
 Q_{gw} - Fluxo de base que entra no canal no dia (mm)
 $Q_{i,est}$ - Variável estimada (adimensional)
 $Q_{i,obs}$ - Variável observada (adimensional)
 Q_{lat} - Escoamento lateral para um dado dia i (mm)
 $Q_{sup(i)}$ - Lâmina de escoamento superficial (mm)
 $R_{dia(i)}$ - Lâmina de chuva (mm)
 $sw_{0(i)}$ - Lâmina inicial de água no solo (mm)
 $SW_{ly,excess}$ - Excesso de água armazenada na camada saturada do solo (mm)
 sw_t - Lâmina final de água no solo (mm)
 $T_{máx}$ - Temperatura máxima para um dado dia ($^\circ C$)

- $T_{méd}$ - Temperatura média para um dado dia ($^{\circ}C$)
- T_{min} - Temperatura mínima para um dado dia ($^{\circ}C$)
- T_t - Taxa de infiltração no tempo ($mm\ h^{-1}$)
- WP_{ly} - Umidade do solo no ponto de murcha (adimensional)
- $W_{rchrg,i}$ - Quantidade de água entrando no aquífero no dia qualquer i (mm)
- $W_{rchrg,sh}$ é a quantidade de água entrando no aquífero no dia qualquer i (mm)
- $W_{revap,mx}$ - Quantidade de água que é retirada do aquífero pelo processo revap (mm)
- $w_{seep,i}$ - Quantidade de água que existe na base do perfil do solo no dia qualquer i (mm)
- $w_{seep,i-1}$ - Quantidade água que entra no aquífero no dia i (mm)
- $W_{solo(i)}$ - Lâmina de água entrando nas zonas insaturada do solo (mm)
- α_{gw} - Constante de recessão do fluxo de base (dias)
- α_{pet} - Coeficiente equação de priestley (adimensional)
- β_{rev} - Coeficiente revap, também denominado de Gw_revap (adimensional)
- δ_{gw} - Tempo de drenagem da formação geológica (dias)
- ρ_{ar} - Densidade do ar ($kg\ m^{-3}$)
- ϕ_d - Porosidade do solo ($mm\ mm^{-1}$)
- Ψ_f - Potencial matricial da frente de umidecimento (mm)
- DV_o - Desvio padrão dos dados observados (adimensional)
- Q_e - Vazão simulada ($m^3.s^{-1}$)
- Q_m - Vazão média observada ($m^3.s^{-1}$)
- Q_o - Vazão observada ($m^3.s^{-1}$)
- Δ - Declividade da curva da relação entre a pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)
- $\Delta\theta_s$ - Variação na umidade do solo ($mm\ m^{-1}$)
- Δt - Variação de tempo (s)
- Alpha_bf- Coeficiente de recessão do fluxo de base (dias)
- ANA- Agência Nacional das Águas
- ARS- Serviço de pesquisas Agrícolas
- Biomix- Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional)
- Blai- Índice de área foliar máximo ($m^2\ m^{-2}$)
- Canmx- Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)
- CEPLAC- Comissão Executiva do Plano Da Lavoura Cacaueira
- Ch_k2- Condutividade hidráulica efetiva do canal ($mm\ h^{-1}$)
- Ch_N2- Coeficiente de Manning para o canal principal ($s\ m^{-1}$)

CN- Número da curva
 CN2- Número da curva inicial para a condição de umidade AMCII (adimensional)
 CNI- Condição de umidade antecedente de baixa umidade
 CNII- Condição de umidade antecedente média
 CNIII- Umidade acima da capacidade de campo
 CREAMS- Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System
 E- Profundidade da taxa de evaporação (mm dia^{-1})
 EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
 Epc- Fator de compensação de consumo de água pelas plantas (adimensional)
 Epc*- Fator de compensação do consumo de água pelas plantas (adimensional)
 EPIC- Erosion-Productivity Impact Calculator
 ES- Escoamento acumulado (mm)
 FC_{ly}- Umidade do solo na capacidade de campo (adimensional)
 FAO- Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
 G- Densidade de fluxo de calor para o solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)
 GLEAMS- Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems
 Gw_Revap*- Coeficiente de ascensão da água à zona de saturação (adimensional)
 Gwqmn- Nível limite de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de base (adimensional)
 HRU- Unidades de Resposta hidrológica
 INMet- Instituto Nacional de Meteorologia
 LH- Método de amostragem Latin-hypercube simulations
 L_{hill} - Comprimento da rampa (m)
 MDEHC- Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente
 MUSLE- Equação Universal de Perda de Solo Modificada
 NSE- Coeficiente de Nash-Sutcliffe
 OAT – Abordagem de sensibilidade One-a-factor-atime
 P- Lâmina precipitada (mm)
 Pbias- Porcentagem de viés (%)
 QUAL2E- Enhanced Stream Water Quality Model
 r_a- Resistência aerodinâmica (s m^{-1})
 r_c- Resistência do dossel da vegetação (s m^{-1})
 Revapmn- Profundidade limite da água no aquífero para que ocorra ascensão da água à zona não saturada do solo (mm)
 RMSE- Raíz quadrada do erro médio
 ROTO- Routing Outputs to Outlets

RSR- Erro padrão médio normalizado

S- Parâmetro de retenção

SCE-UA- Shuffled Complex Evolution Algorithm

SCS- Soil Conservation Service

Si- Sensibilidade

SIG- Sistema de Informações Geográficas

S_{ij}- Sensibilidade Parcial dos Parâmetros

Slope- declividade média da sub-bacia (mm mm^{-1})

Slp- Parâmetro do SWAT declividade da sub-bacia (mm mm^{-1})

S_{lsubbsn}- Comprimento médio da encosta (m)

Sol_{alb}- Albedo do solo (adimensional)

Sol_{awc}- Capacidade de armazenamento de água no solo (mm mm^{-1})

Sol_k- Parâmetro do SWAT condutividade hidráulica do solo (mm h^{-1})

Sol_z- Profundidade da camada do solo (mm)

SSQ- Soma do Quadrado do Resíduo

Surlag- Coeficiente de atraso do escoamento superficial (dias)

SWAT- Soil and Water Assessment Tool

SWRRB- Simulator for Water Resources in Rural Basin

Tloss - Perdas de transmissão em canais tributários ou por lixiviação na sub-bacia (mm)

USDA- Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

USGS- United State Geological Survey

UTM – Projeção Transversa de Mercator

W_{prod}- Quantidade de água produzida (mm)

W_{pump} - Quantidade de água retirada do aquífero por bombeamento (mm)

W_{revap} - Quantidade de água que retorna a franja capilar através do revap (mm)

γ - Constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

λ - Calor latente de vaporização (MJ Kg^{-1})

λE - Densidade de fluxo latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Catolé Grande, localizada na região sudoeste da Bahia, tem grande importância socioeconômica devido a utilização para abastecimento do município de Vitória da Conquista e na atividade agropastoril da região. Estes aspectos ratificam a importância de estudos que auxiliem no gerenciamento dessa bacia, tal como a produção de água, que possibilita o conhecimento da dinâmica dos componentes hidrológicos da região. Os modelos hidrológicos têm sido bastante utilizados para esta finalidade devido aos resultados eficientes e baixo custo de operação, dentre os quais destaca-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) por sua aplicação sob diferentes condições de solo, manejo e clima apresentando bons resultados. Objetivou-se com este trabalho estudar a produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande utilizando o SWAT, bem como avaliar o desempenho do modelo em escala mensal. Como inputs do modelo foram utilizados dados meteorológicos, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMet) e Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (Ceplac), mapas de tipo de solo, disponibilizados pela Ceplac, Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) e mapa de uso e ocupação do solo, elaborados utilizando o software ArcGis. Por meio da análise de sensibilidade foi identificado maior sensibilidade do modelo aos parâmetros CN2, ESCO e Gwqmn. Em seguida realizou-se calibração automática do modelo para o período de 2003 a 2005 e validação de 1997 a 2000. Os coeficientes obtidos para simulação da vazão NSE, Pbias e RSR foram, respectivamente, 0,54, 5,13% e 0,68 obtidos na calibração e 0,53, 6,24% e 0,69, na etapa de validação. A partir dos coeficientes estatísticos obtidos, o ajuste do modelo pode ser considerado satisfatório. A partir dos resultados observou-se que a produção de água foi afetada principalmente pelo tipo de solo e escoamento lateral, sendo as sub-bacias 3, 4, 6 e 7 responsáveis pela maior contribuição na produção de água. O modelo SWAT foi capaz de simular satisfatoriamente a produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, SWAT, produção de água.

ABSTRACT

The river basin Catolé Grande, located in the southwest of Bahia, has great socio-economic importance due to use to supply the city of Vitoria da Conquista and agropastoral activity in the region. These aspects confirm the importance of studies to assist in the management of this basin, such as the production of water, which allows the knowledge of the dynamics of the hydrological components of region. Hydrological models have been widely used for this purpose due to efficient results and low operating costs, among which stands out the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) for its application under different soil conditions, management and climate with good results. The objective of this work was to study the water production in the basin of the river Grande Catolé using SWAT and evaluate the model's performance on a monthly scale. As model inputs were used meteorological data provided by the National Institute of Meteorology (INMET) and Executive Committee of the Cocoa Farming Plan (Ceplac), soil type maps, provided by Ceplac, digital elevation model hydrologically consistent (MDEHC) and map of land use and occupation, developed using the ArcGIS software. Through the sensitivity analysis was identified increased sensitivity of the model to CN2 parameters, ESCO and Gwqmn. Then held automatic calibration model for the period 2003-2005 and validation from 1997 to 2000. The coefficients for simulation NSE flow, Pbias and RSR were respectively 0.54, 5.13% and 0.68 obtained in the calibration and 0.53, 6.24 and 0.69% in the validation stage. From the statistical coefficients, the model fit can be considered satisfactory. From the results it was observed that the production of water was mainly affected by soil type and lateral flow, with sub-basins 3, 4, 6 and 7 accounted for the major contribution to the production of water. The SWAT model was able to satisfactorily simulate the water production in the basin of river Catolé Grande.

Keywords: hydrologic modeling, SWAT, water yield.

1.0 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e de domínio público que pode ser utilizado como bem de consumo final ou intermediário, possuindo múltiplos usos como na atividade agrícola, industrial, doméstica, comercial, para navegação, produção elétrica, dentre outras. Preservação e uso sustentável deste recurso são de indiscutível importância para continuidade do atendimento da demanda sem que a disponibilidade para as gerações futuras sejam afetadas.

O desequilíbrio entre oferta e demanda de água tem causado conflito pelo uso dos recursos hídricos. O aumento na demanda em consequência do crescimento populacional acentuado das últimas décadas, associado ao mal gerenciamento dos mananciais e bacias hidrográficas, são as principais causas da escassez hídrica. Atrelado a isso, tem-se o desenvolvimento das atividades antrópicas, promovendo, entre outros fatores, a degradação do solo e dos corpos hídricos, afetando a qualidade e disponibilidade de água dentro de uma bacia hidrográfica. Esses aspectos tem intensificado a escassez hídrica e aumentado o conflito entre os usuários.

Diante deste cenário, é essencial a gestão adequada dos recursos hídricos para evitar conflitos e garantir qualidade de vida à população futura ao mesmo tempo que promove o crescimento econômico. A gestão dos recursos hídricos deve estar alicerçada no gerenciamento preditivo, integrado e em nível de bacia hidrográfica (TUNDISI, 2008).

Uma das alternativas que o governo federal buscou para contornar o problema da disponibilidade hídrica foi a criação do Programa Produtor de Água. Por meio deste programa o governo apoia a melhoria, recuperação e proteção dos recursos hídricos em bacias hidrográficas estratégicas, dentre as quais encontram-se as bacias utilizadas para abastecimento público e sujeitas a eventos críticos, como observado nas bacias hidrográficas localizadas em regiões semiáridas (ANA, 2012).

Como suporte ao Programa Produtor de Água é primordial a caracterização dos fatores que afetam direta ou indiretamente o regime hídrico de uma bacia hidrográfica, compreensão da interação deles com o solo, vegetação, atmosfera e com a própria água dentro da bacia hidrográfica (MELO NETO, 2013).

Apesar da importância do conhecimento das variáveis hidrológicas, o monitoramento delas requer investimentos elevados, a fim de criar infraestruturas capazes de realizar a cobertura de toda área de estudo. Por esse aspecto, muitas vezes as bases de dados para determinada bacia, são insuficientes ou inexistente, além de que os dados observados fornecem apenas informações inerentes ao local de medição (BRESSIANE et al., 2015).

Neste contexto, a modelagem hidrológica pode ser utilizada como ferramenta promissora para obtenção de conhecimento mais aprofundado a respeito dos fenômenos físicos que afetam os componentes do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas (MORAES, 2003). Dentre os muitos modelos que permitem estimar a produção de água em escala de bacia hidrográfica, destacam-se os modelos distribuídos e semi-distribuídos. Um dos modelos mais atuais é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), o qual possui grande divulgação e aplicação no cenário científico, permitindo simular vazão, sedimentos e qualidade de água. Gassman et al. (2007) registraram, até o ano de 2007, mais 270 trabalhos publicados relacionados com aplicações do SWAT e seus componentes em periódicos de impacto internacional, mostrando que o modelo matemático e computacional SWAT versão 2005 já é bastante consolidado na área de simulação hidrológica e com grande aplicabilidade na gestão de bacias hidrográficas (GASSMAN et al., 2007).

O SWAT tem sido utilizado por órgãos governamentais, empresas privadas e pesquisadores para auxiliar na tomadas de decisões para o problema dos recursos hídricos em regiões diferente das que fora desenvolvido, como no Brasil (BRESSIANI et al., 2015).

A quantidade de pesquisas publicadas utilizando o SWAT em bacias hidrográficas no nordeste brasileiro tem aumentado nos últimos anos segundo pesquisa de Bressiani et al.(2015). Esta região tem boa parte caracterizada pelo clima árido e semiárido apresentando longos períodos de seca o que ratifica a importância da aplicação de ferramentas eficientes na tomada de decisão sobre os recursos hídricos, uso e manejo do solo.

Localizada no estado da Bahia, a bacia hidrográfica do rio Catolé Grande é um dos principais afluentes da bacia do rio Pardo no estado da Bahia, com área de drenagem abrangendo sete municípios. Nesta bacia, desenvolvem-se atividades agrícolas e pecuárias, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento socioeconômico regional. O rio

Catolé Grande é utilizado no abastecimento hídrico de vários municípios da região, entre eles Itapetinga e Vitória da Conquista, sendo esta a terceira maior cidade do estado em população.

Apesar de sua importância dentro da região do sudoeste da Bahia, a bacia hidrográfica do rio Catolé Grande não possui comitê de bacias que garanta bom gerenciamento dos recursos hídricos e arbitre sobre os conflitos pelo uso da água. A bacia hidrográfica também apresenta elevado grau de desmatamento, onde a Mata Atlântica que cobria a região deu lugar a pastagens, que em sua grande maioria não são bem manejadas.

Diante do exposto, o modelo hidrológico SWAT torna-se uma excelente ferramenta de gestão ambiental e direcionamento na tomada de decisões, no que se refere ao planejamento de uso e conservação do solo e da água na bacia do rio Catolé Grande, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos.

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande, empregando como ferramenta o modelo hidrológico SWAT, bem como avaliar o desempenho do modelo em escala mensal.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar análise de sensibilidade do modelo SWAT, para identificar os parâmetros que mais influenciam na estimativa da vazão do rio principal da bacia;
- Calibrar e validar o modelo SWAT em escala de tempo mensal, com base nos dados experimentais e coeficientes estatísticos;
- Analisar a produção de água em sete sub-bacias do rio catolé grande e seus efeitos nos componentes do balanço hídrico abrangendo o período de calibração e validação do modelo.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Bacia Hidrográfica e o ciclo Hidrológico

Bacia hidrográfica pode ser definida como uma área delimitada topograficamente onde toda água captada é drenada para único ponto denominado exutório. Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº9.433 de 1997, a bacia hidrográfica deve ser a unidade territorial para implementar as políticas ambientais e onde deve atuar o gerenciamento dos recursos hídricos. Sua aplicação como unidade de estudo propicia levantamento regional mais completo, pois a mesma fornece informações físicas, biológicas e socioeconômicas da área (GUERRA et al., 2005).

Uma vez delimitada com base em critérios geomorfológicos, a bacia hidrográfica torna-se unidade ideal para o planejamento e tomada de decisões sobre o uso da terra (GUERRA et al., 2005).

Realizada a delimitação da bacia hidrográfica, pode-se utilizá-la na realização de estudos envolvendo uso e ocupação do solo e impactos decorrentes das atividades antrópicas. Um dos principais compartimentos ambientais estudados neste contexto são os recursos hídricos.

Uma das maneiras de analisar impactos nos recursos hídricos é estudando o ciclo hidrológico. Isso é possível devido a sensibilidade que as fases deste ciclo apresentam em relação às alterações no uso e ocupação do solo. Melo Neto (2013) afirma que as principais informações para estudo do ciclo hidrológico são contempladas na bacia hidrográfica e que as características dela afetam o balanço hídrico da região, sobretudo aspectos físicos e referentes a cobertura vegetal. Sendo assim, o ciclo hidrológico pode ser estudado na bacia hidrográfica garantindo conclusões confiáveis sobre o impacto do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos (TEODORO et al., 2007).

Tucci (2002) define ciclo hidrológico como processo de circulação da água de forma fechada entre a atmosfera e a superfície terrestre gerada primordialmente pela energia solar juntamente com a força gravitacional e movimento de rotação da Terra. O ciclo hidrológico representa os diferentes caminhos que a água pode percorrer e a mudança de estado físico ao

longo do tempo, não apresentando início ou fim, devido ao movimento contínuo da água entre a atmosfera e a superfície terrestre.

Os fatores que influenciam no ciclo hidrológico são a força dos ventos, responsável por mover as massas de ar pelos oceanos e continentes, radiação solar, que fornece a energia necessária para a mudança de estado físico das moléculas de água e a força da gravidade, responsável pelos fenômenos da precipitação, da infiltração e escoamento das massas de água (TUNDISI, 2010).

O fluxo de água ocorre em dois sentidos: superfície-atmosfera, onde a água ascende em forma de vapor proveniente dos processos de evaporação e transpiração, e atmosfera – superfície, no qual o fluxo de água ocorre em forma de precipitação. Existem várias formas de precipitação, contudo a mais comum e significativa é em estado líquido, principalmente nas regiões tropicais como no caso do Brasil (TUCCI, 2002).

Os principais componentes do ciclo hidrológico são precipitação, evaporação, transpiração das plantas, percolação, infiltração e escoamento superficial (TUNDISI, 2010). Na Figura 1 são demonstradas as etapas do ciclo e os sentidos do fluxo.

Assim como Silveira (2009), para melhor compreensão, será considerado o início do ciclo hidrológico a partir da presença de vapor de água na atmosfera. Nesse momento, é iniciada a formação das gotículas de água que em seguida se agrupam para formar as nuvens e, pela dinâmica das massas, ocorre a precipitação.

A precipitação representa o papel de conectividade entre os fenômenos meteorológicos com a fase da terra do ciclo hidrológico, que envolve o escoamento, infiltração e evapotranspiração (GARCEZ e ALVAREZ, 1988). Tal aspecto torna a intensidade, duração e frequência das precipitações fatores importantes nos estudos ambientais.

Nem toda a precipitação que ocorre chega a superfície terrestre em virtude da evaporação e das interceptações que acontecem no trajeto atmosfera-superfície (TUCCI, 2002). Parte do montante precipitado fica armazenado no dossel das árvores ou cobertura do solo, caracterizadas como perdas iniciais, ficando disponíveis apenas para a evaporação não contribuindo para a infiltração e escoamento superficial (NEISTCH et al., 2005).

A água que chega a superfície terrestre, em se tratando de superfície permeável, passa pelo processo de infiltração e poderá ser absorvida pelas plantas, abastecer os lençóis freáticos a partir da percolação profunda, ou mesmo evaporar. No momento que o solo atingir a saturação, a capacidade de infiltração corresponderá à taxa de infiltração estável (TUCCI, 2002). Se a intensidade de precipitação for superior a taxa de infiltração do solo começará a

ocorrer o armazenamento superficial. Excedida esta capacidade terá início o escoamento superficial.

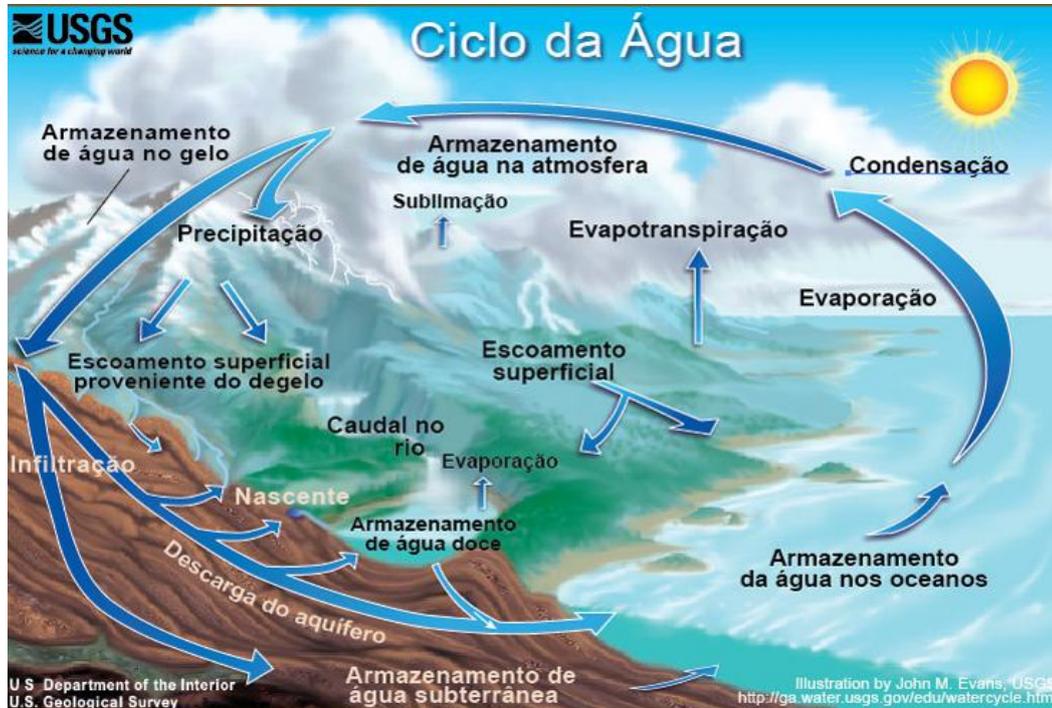


Figura 1: Processos que formam o ciclo hidrológico. (Fonte: USGS,2015)

A vazão nos cursos de água durante período de chuvas é formado pelo escoamento superficial juntamente com fluxo de base e escoamento lateral. Nos períodos de estiagem, o fluxo lateral e de base são responsáveis pelo fluxo nos rios.

O escoamento superficial depende de fatores como precipitação, relevo e condições da superfície do solo, sendo definido como o deslocamento da água na superfície terrestre que acontece pela ação da gravidade (PRUSKI et al., 2001). Esses fatores juntamente com a energia cisalhante associada ao escoamento, fazem desta etapa uma das mais importantes do ciclo para os estudos de conservação ambiental (GARCEZ e ALVAREZ, 1988).

A lâmina precipitada que infiltra no solo pode recarregar os aquíferos ou contribuir para o escoamento lateral. Os aquíferos são divididos em livres e confinados, sendo que o primeiro submetido à pressão atmosférica contribui para a vazão do rio enquanto o segundo fica armazenado sob uma camada impermeável de rochas fazendo com que não ocorra contribuição deste na vazão do canal. O escoamento lateral, ou lateral, é a parte da precipitação infiltrada que contribui na vazão do canal antes que a água atinja o aquífero freático, sendo proveniente da movimentação da água no perfil do solo.

A água presente na superfície terrestre passa para a atmosfera por meio dos mecanismos de evaporação da água da superfície do solo, rios, lagos, oceanos, etc. e da evapotranspiração. A evaporação é a mudança de estado físico da água de líquido para gasoso através da absorção de energia solar pelas partículas de água. Por sua vez, a evapotranspiração é definida como a transformação da água em vapor a partir da evaporação somado ao processo fisiológico de transpiração das plantas, sendo diretamente influenciada pela cobertura vegetal do solo e características da vegetação local (NEISTCH et al., 2005).

Quando o vapor chega na atmosfera todos os processos descritos ocorrem novamente. A dinâmica do ciclo irá depender das condições iniciais do solo e meteorológicos da região.

Através das características e processos supracitados, o entendimento do ciclo hidrológico e como ele ocorre dentro de uma bacia hidrográfica é de fundamental importância na conservação ambiental dos recursos hídricos e na avaliação dos impactos causados por mudanças no uso e ocupação do solo.

3.2 Modelagem Hidrológica

Os modelos matemáticos voltados para estudos ambientais consistem na representação matemática dos processos que acontecem na natureza, tendo como objetivo compreender melhor o que ocorre no meio ambiente e prever situações futuras, evitando prejuízos ambientais e socioeconômicos (MACHADO, 2002). Os modelos facilitam estudos em regiões inacessíveis ou onde a aplicação de métodos convencionais é inviável além de evitar custos para estudos em grandes áreas de forma rápida e assegurando resultados satisfatórios (PANHALKAR, 2014).

A modelagem hidrológica é uma ferramenta para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (TUCCI, 2005). Por outro lado, Rennó e Soares (2000) definem modelos hidrológicos como “a representação da água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestres”. De forma mais ampla, estes modelos podem descrever cada etapa do ciclo hidrológico como a distribuição da precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial entre outros, separadamente ou em conjunto.

A modelagem hidrológica apareceu com a utilização de modelos simples, sendo as primeiras pesquisas para construção de modelos focadas em cada etapa do ciclo hidrológico de forma separada, como por exemplo a teoria de infiltração de água no solo proposta por Horton em 1933 (PAIVA, 2009). Os primeiros avanços mais significantes foram a partir de 1930

devido ao desenvolvimento de programas de pesquisas hidrológicas por órgãos governamentais em países desenvolvidos (FAYAL, 2008).

O aumento da quantidade e aperfeiçoamento dos modelos hidrológicos foi dada por meio da disseminação da informática e do incremento na capacidade de processamento dos computadores. Este avanço propiciou o aparecimento de modelos do tipo Chuva-vazão, que relacionam a precipitação diretamente com a vazão nos corpos hídricos, seguidos da construção de modelos empíricos (FAYAL, 2008).

Discussões sobre a classificação dos modelos podem ser encontradas em Rennó e Soares (2000), Vertessy et. al. (1993) e Merritt et al. (2003). Dependendo do aspecto os modelos se classificam como empíricos, conceituais, fisicamente baseado, aglomerados (pontuais) ou distribuídos.

Modelos tidos como empíricos são basicamente oriundos de observações que visam caracterizar o sistema a partir destes dados. Tais modelos são aplicados em diversas situações, mas são fortemente criticados por desconsiderarem a heterogeneidade física dos locais. Sua principal vantagem é o baixo requerimento computacional. Por sua vez, os modelos conceituais são mais complexos que os empíricos pelo fato de considerarem um número maior de processos envolvidos no fenômeno estudado (RENNÓ e SOARES, 2005).

Os modelos fisicamente baseados utilizam leis e equações físicas para explicar fenômenos ou processos que ocorrem na natureza. As equações físicas utilizadas neste tipo de modelagem apresentam parâmetros que segundo Merritt et al. (2003) podem ser mensurados, porém em situações práticas pode ser impossível devido à complexidade das bacias hidrográficas, sendo necessário a calibração destes parâmetros com base nos dados observados.

Nos modelos aglomerados a aplicação dos *inputs* e *outputs* são representativos para toda a área de estudo. Em contrapartida, os modelos distribuídos fazem a discretização do espaço, dividindo a área de estudo em subáreas para avaliação separadamente e com a junção destas unidades é obtido o produto final da simulação (RENNÓ e SOARES, 2000). A introdução da variabilidade espacial agrega aos modelos distribuídos maior representatividade da realidade em comparação com os modelos aglomerados, garantindo a representação da heterogeneidade da área de estudo.

Os modelos semidistribuídos, representados pelo equilíbrio entre os modelos distribuídos e aglomerados, permitem simulação de uma bacia como o todo. Nestes modelos, ocorre a subdivisão da região em outras menores, nas quais serão realizados estudos separados e por fim, juntas fornecerão conclusões da área como um todo (MERRITT et al., 2003). Essa

representatividade das variações temporais e espaciais para os inputs e outputs aumentam a eficiência dos semidistribuídos se comparado com os aglomerados (BALSSINERA, 2005)

Independente do modelo utilizado, a modelagem hidrológica se tornou excelente ferramenta para análise ambiental devido à necessidade da compreensão dos processos hidrológicos que ocorrem na área de estudo no momento das tomadas de decisões (SILVA; UZEIKA, 2012). Braga et al. (2012) afirmam que modelos hidrológicos permitem a demonstração da estrutura e funcionamento de sistemas ambientais como um todo, podendo ser aplicados para várias finalidades.

A escolha do modelo para simulação depende da finalidade da pesquisa, características da área, capacidade do modelo, facilidade na utilização e do requerimento de hardware (MERRITT et al., 2003). Desta forma, não há como apontar um modelo que seja unanimidade para todas as situações, mas sim o que melhor se adequa às demandas do estudo em questão.

3.3 O modelo SWAT

O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo hidrológico desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) do Serviço de pesquisas Agrícolas (ARS) na década de 1980. Os objetivos da criação do modelo eram prever o impacto do manejo, uso e ocupação do solo e água, produção de sedimentos e agrotóxicos em bacias hidrográficas para um longo período de tempo (NEITSCH et. al, 2005).

Trata-se de um modelo gratuito, fisicamente baseado, contínuo no tempo, computacionalmente eficiente e que permite análise dos processos hidrológicos em escala diária, sub-diária e mensal em bacias hidrográficas por meio de parâmetros espacialmente distribuídos (NEITSCH et. al, 2005; MELO NETO, 2012). O SWAT é capaz de estimar escoamento superficial, infiltração, processos hidrossedimentológicos, nutrientes, qualidade de água entre outros, demonstrando ser uma excelente ferramenta na gestão dos recursos hídricos.

O SWAT contém recursos de vários outros modelos desenvolvidos por pesquisadores da ARS descendendo diretamente do Simulator for Water Resources in Rural Basin (SWRRB) que agregou o Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System (CREAMS), Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems (GLEAMS), Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) e posteriormente o Routing Outputs to Outlets (ROTO) e o Enhanced Stream Water Quality Model (QUAL2E) (ARNOLD e FOHRER, 2005). Na Figura 2 são apresentados os modelos que fizeram parte da evolução do SWAT.

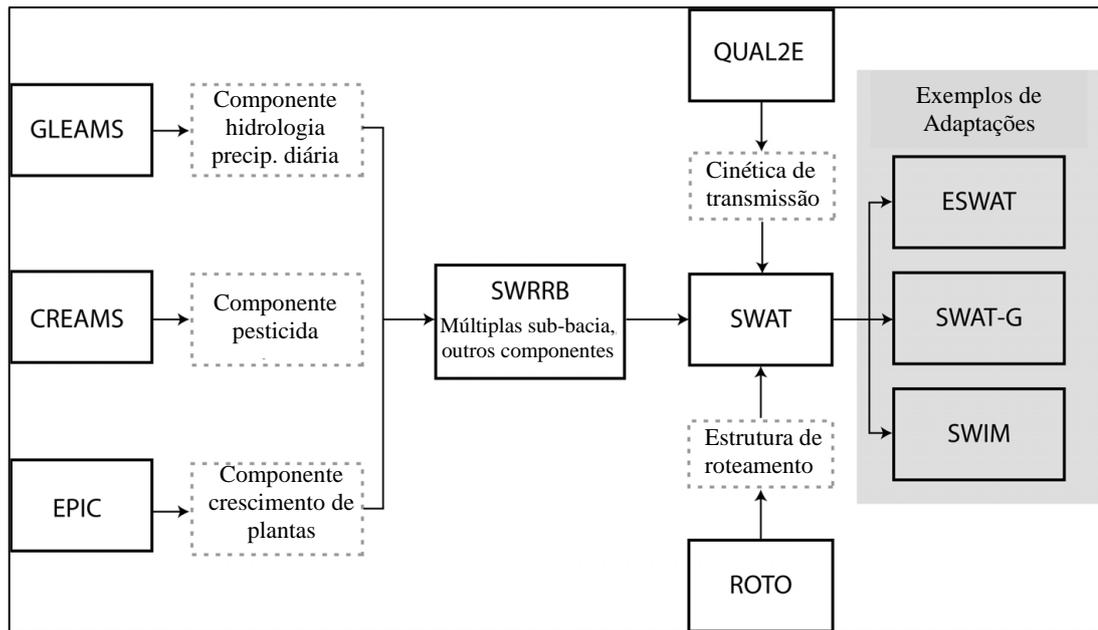


Figura 2: Modelos que fizeram parte do desenvolvimento do SWAT. Fonte: Grassman et al. (2007)

A base de toda a modelagem realizada pelo modelo SWAT está fundamentada na equação da continuidade para o balanço hídrico, realizado na bacia hidrográfica de estudo e descrita pela Equação 1.

$$sw_t = sw_{0(i)} + \sum_{i=1}^t (R_{dia(i)} - Q_{sup(i)} - E_{a(i)} - W_{solo(i)} - Q_{gw(i)}) \quad \text{Eq. 1}$$

em que: sw_t é a lâmina final de água no solo, mm; $sw_{0(i)}$ é a lâmina inicial de água no solo no dia i , mm; t é o tempo, dias; $R_{dia(i)}$ é a lâmina de chuva no dia i , mm; $Q_{sup(i)}$ é a lâmina de escoamento superficial para o dia i , mm; $E_{a(i)}$ é a lâmina de água evapotranspirada para o dia i , mm; $W_{solo(i)}$ é a lâmina de água entrando nas zonas insaturada do solo no dia i , mm e $Q_{gw(i)}$ é a parcela da vazão no canal oriunda do escoamento lateral para o dia i , mm (NIETSCH, 2005).

Para realizar a modelagem hidrológica utilizando o SWAT são necessários dados de entrada referentes às variáveis físicas e meteorológicas da área de estudo (SILVA; MELO NETO, 2013). As variáveis físicas que devem ser fornecidas ao modelo referem-se ao relevo, declividade, uso do solo e classes de solo.

As informações sobre relevo e declividade são fornecidas ao SWAT utilizando como entrada o modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC) no formato raster, a partir do qual é realizada a delimitação da área de captação hídrica da bacia, rede de

drenagem e sub-bacias (NIETSCH, 2005). Os usos e classes de solo são utilizadas no SWAT em forma de mapas, em formatos shapefile ou raster, contendo informações sobre a cobertura vegetal, tipo de cultura e propriedades físico - químicas do solo da bacia hidrográfica.

As variáveis meteorológicas necessárias na modelagem com o SWAT incluem dados diários de temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento (GASSMAN, 2007). Esses dados de entrada quando não disponíveis podem ser estimados com utilização do gerador climático disponível no próprio modelo.

Uma vez obtidos e formatados conforme padrão utilizado pelo modelo, os dados de entrada são trabalhados em interface associada com o software de geoprocessamento ArcGis. A interface nada mais é do que uma barra de ferramenta habilitada no ArcGis, denominada de Arcswat, a qual auxilia na entrada de dados e a edição entre o modelo hidrológico e a ferramenta de Sistema de Informações Geográficas (SIG) (COFFEY et al., 2010).

Para realização das simulações é realizada a discretização do modelo na qual a bacia hidrográfica é subdividida em sub-bacias com base em critérios estabelecidos pelo usuário no SWAT. Nas sub-bacias são identificadas regiões com características homogêneas quanto ao tipo, uso e manejo do solo e declividade. Essas áreas são denominadas de Hydrology Response Units (HRU), no português Unidades de Resposta Hidrológica, e nelas são realizadas estimativas do balanço hidrológico (NEITSCH et al., 2005; GASSMAN, 2007).

A subdivisão da bacia em HRU é benéfica para a modelagem pelo aumento na acurácia do modelo. Isso explica-se pela variação que ocorre dentro das sub-bacias, haja vista que o crescimento e desenvolvimento das plantas variam muito entre as diferentes espécies e as propriedades físico-químicas são diferentes para cada classe de solo. Ao utilizar HRU, essa variação é considerada pelo modelo, fato que não ocorre quando realizada modelagem em nível de sub-bacia, na qual é considerada uma única combinação de tipos e uso do solo e declividade. Como exemplo temos a evapotranspiração, que calculada em níveis de HRU é mais precisa que considerando apenas uma cobertura do solo para toda a sub-bacia (ARNOLD et al., 2012).

Para estimar a propagação do escoamento, sedimentos e agroquímicos na bacia hidrográfica, o SWAT é dividido em oito grandes componentes (MELO NETO, 2013): Clima, hidrologia, erosão, solo, cobertura vegetal, nutrientes, pesticida e manejo do solo.

O componente clima é responsável por fornecer a umidade e a energia de entrada que exercem controle sobre o ciclo hidrológico. O componente hidrologia fornece todos os parâmetros para os cálculos das etapas do ciclo hidrológico propiciando ao modelo a estimativa do balanço hídrico. A erosão e produção de sedimentos são responsáveis por quantificar a perda

de solo que ocorre dentro da área de estudo e seu transporte para os canais utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Modificada, do inglês Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE (NEISTCH, 2005).

No componente solo são fornecidas as informações inerentes as propriedades físicas e químicas do solo, como a condutividade hidráulica e textura, que irão interferir diretamente na quantidade de escoamento superficial e na taxa de infiltração da água no solo. O componente crescimento das plantas é utilizado na avaliação da remoção de água e de nutrientes a partir da raiz, transpiração e produção de biomassa.

Pesticidas e nutrientes são analisados através dos ciclos do nitrogênio, fósforo e da propagação dos pesticidas dentro do canal decorrente em grande parcela do escoamento superficial (NEISTCH, 2005). Esse componente não é utilizado quando o objetivo da simulação é quantificar a produção de sedimentos de uma bacia.

No componente manejo do solo é permitido ao usuário definir as práticas de cultivo e tipo de cultura dentro da bacia. Isso permite realizar simulações para diferentes cenários a fim de obter o impacto dessas práticas no escoamento, produção de sedimentos e qualidade de água (NEISTCH, 2005).

3.3.1 A evapotranspiração no modelo SWAT

Para cálculo da evapotranspiração potencial, o SWAT fornece como opções os métodos de Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. O método de Penman - Monteith é considerado, internacionalmente, o mais completo para a estimativa da evapotranspiração potencial, pois ele combina componentes responsáveis pela energia utilizada para ocorrência da evapotranspiração com componentes de resistência aerodinâmica e de superfície, além de ser alimentado por quase todos os elementos meteorológicos observados em estações meteorológicas (SILVA et al., 2015).

Na Equação 2 é apresentada o método apresentado por Penman em 1948 e modificado por Monteith em 1965, conhecido como Equação de Penman-Monteith.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{ar} \cdot C_p \cdot [(e_s - e_a)]/r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c/r_a)} \quad \text{Eq. 2}$$

em que λE é a densidade de fluxo latente, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; E é a profundidade da taxa de evaporação, mm dia^{-1} ; Δ representa a declividade da curva da relação entre a pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; H_{net} é a radiação, $\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$; G é

a densidade de fluxo de calor para o solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; ρ_{ar} é a densidade do ar, kg m^{-3} ; C_p , é o calor específico a temperatura constante, $\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $(e_s - e_a)$ representa o déficit de pressão do vapor do ar, kPa; γ é a constante psicométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; r_c é a resistência do dossel da vegetação, s m^{-1} e r_a é a resistência aerodinâmica, s m^{-1} .

Devido essas características o método de Penman-Monteith é adotado como método padrão para estimativa da evapotranspiração segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura – FAO (ALLEN et al., 1998).

A equação de Priestley – Taylor foi desenvolvida para estimar a evapotranspiração potencial em regiões mais úmidas e com condições de baixa advecção. Tal característica torna este método inapropriado para aplicações em locais de clima árido e semiárido onde as condições climáticas são mais secas o favorece o processo de advecção são elevadas, acarretando em subestimação da evapotranspiração (NEITSCH, 2005). A equação de Priestley – Taylor está apresentada na Equação 3.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \quad \text{Eq.3}$$

em que λ é calor latente de vaporização, MJ Kg^{-1} ; E_0 é evapotranspiração potencial, mm dia^{-1} ; α_{pet} é um coeficiente de Priestley-Taylor, Δ representa a declividade da curva da relação entre a pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; γ é a constante psicométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; H_{net} é a radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; G é a densidade de fluxo de calor para o solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

A diferença entre a equação de Priestley – Taylor e a de Penman- Monteith é a retirada do componente aerodinâmico e a multiplicação do componente energia pelo coeficiente α_{pet} (NEISTCH et al., 2005).

Originalmente obtida a partir da análise de oito anos de dados de evapotranspiração de relva com lisímetro de precisão e com análise de regressão, o método de Hargreaves foi modificado até a forma apresentada na Equação 4 (SHAHIDIAN et al., 2011). Devido as baixa exigência de dados para utilização, o método de Hargreaves é bastante utilizado em muitos países.

$$\lambda E_0 = 0,0023 \cdot H_0 \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{min}})^{0,5} \cdot (T_{\text{méd}} + 17,8) \quad \text{Eq. 4}$$

em que λ é o calor latente de vaporização, MJ kg⁻¹; E_0 é evapotranspiração potencial, mm dia.⁻¹; H_0 é a radiação extraterrestre, MJ m⁻² d⁻¹; $T_{\text{máx}}$ é a temperatura máxima para um dado dia, °C; T_{min} é a temperatura mínima para um dado dia, °C e $T_{\text{méd}}$ é a temperatura média para um dado dia, °C.

3.3.2 Escoamento superficial

O escoamento superficial com o SWAT pode ser estimado por meio dos métodos de infiltração de Green e Ampt Main Larson e da Curva Número SCS.

Para utilizar o método da infiltração de Green e Ampt, posteriormente modificado por Mein e Larson, é necessário a disponibilidade de dados de precipitação sub-diários, a partir dos quais calcula-se a infiltração por meio da Equação 5. A fração da precipitação que não infiltrar no perfil do solo será caracterizada como escoamento superficial.

$$T_t = k_e \cdot \left(1 + \frac{\Psi_f \cdot \Delta\theta_s}{I_t} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

em que T_t é a taxa de infiltração no tempo t , mm h⁻¹; k_e é a condutividade hidráulica efetiva do solo, mm hr⁻¹; Ψ_f é o potencial matricial da frente de umidécimento, mm; $\Delta\theta_s$ é a variação na umidade do solo, mm m⁻¹ e I_t é a infiltração acumulada no tempo t , mm.

Devido à dificuldade na obtenção de dados sub-diários de precipitação, impossibilitando a aplicação do método de Green e Ampt, o método da Curva Número SCS é o mais utilizado. Desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS), o método foi resultado de mais de 20 anos de pesquisa analisando a relação entre precipitação e escoamento superficial em pequenas bacias rurais nos Estados Unidos (NEITSHC, 2005). O método da Curva Número é dado pela Equação 6.

$$ES = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{(P + 0,8 \cdot S)} \quad \text{Eq. 6}$$

em que ES é o escoamento acumulado, mm, P é a lâmina precipitada, mm e S é o parâmetro de retenção, adimensional.

O parâmetro de retenção varia de acordo com as alterações no solo, manejo, uso da terra, declividade e mudanças na umidade do solo e condições hidrológicas (NIETSCH, 2005). Ele é definido pela Equação 7.

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad \text{Eq. 7}$$

em que CN é o número da curva, podendo variar entre 1 e 100.

O número da curva é obtido a partir de tabelas sendo necessário o conhecimento dos tipos de solo da região e condições de superfície (PRUSKI, 2009). Os tipos de solo são separados por grupos, sendo classificados pelo SCS – USDA em:

- Grupo A: Solos com alta taxa de infiltração quando estão úmidos, baixo potencial de escoamento, bem drenados e apresentam perfil profundo. Geralmente os solos deste grupo possuem textura arenosa, com pouca presença de silte e argila;
- Grupo B: Quando estão completamente úmidos apresentam uma taxa de infiltração moderada. Apresentam um perfil moderadamente profundo;
- Grupo C: Solos deste grupo possuem uma baixa taxa de infiltração quando estão completamente úmidos, uma textura com considerável teor de argila e uma camada de impedimento considerável; e
- Grupo D: Neste grupo são classificados solos com baixa taxa de infiltração quando completamente úmidos, apresentando desta forma um alto potencial de escoamento superficial.

Os valores de CN geralmente são tabelados para condição de umidade antecedente média (CNII), próxima à capacidade de campo do solo. Contudo, o valor do CN pode ser corrigido para condição de umidade antecedente de baixa umidade (CNI) e umidade acima da capacidade de campo (CNIII). Os valores de CNI e CNIII são calculados em função dos valores de umidade apresentados para a CNII, conforme as equações a seguir:

$$CNI = CNII - \frac{20 \cdot (100 - CNII)}{(100 - CNII + \exp[2,533 - 0,0636 \cdot (100 - CNII)])} \quad \text{Eq. 8}$$

$$CNIII = CNII \cdot \exp[0,00673 \cdot (100 - CNII)] \quad \text{Eq. 9}$$

em que CNI é a condição de umidade antecedente de baixa umidade, adimensional; CNII é a condição de umidade antecedente média, adimensional e CNIII é a condição e umidade acima da capacidade de campo, adimensional.

3.3.3 Escoamento lateral (escoamento subsuperficial)

O escoamento lateral ou lateral é importante principalmente, em solos que possuem alta taxa de infiltração, e possui uma camada impermeável ou semipermeável em baixas profundidades (NEITSCH et al., 2005). Este diferencia-se do escoamento de base a medida em que contribui no canal antes de alcançar a zona limite do aquífero, ou seja, contribui diretamente do perfil do solo (SLOAN et al., 1983).

O modelo SWAT calcula o escoamento lateral através do método desenvolvido por Sloan (1983) e modificado por Sloan e Moore (1984), dado pela seguinte equação:

$$Q_{\text{lat}} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{\text{ly,excesso}} \cdot K_{\text{sat}} \cdot \text{slp}}{\phi_d \cdot L_{\text{hill}}} \right) \quad \text{Eq. 10}$$

em que Q_{lat} é o escoamento lateral para um dado dia, mm dia⁻¹; $SW_{\text{ly,excesso}}$ é o excesso de água armazenada na camada saturada do solo, mm; K_{sat} 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, m.

3.3.3 Escoamento subterrâneo

O modelo SWAT simula dois aquíferos diferentes para cada sub-bacia: raso e profundo. O primeiro é o aquífero freático ou não confinado, o qual é limitado superiormente pelo nível de água do próprio lençol. A contribuição de água subterrâneo no canal é dada pela disponibilidade de água neste aquífero. Além de contribuir na vazão do canal, o volume do aquífero raso também poderá ascender à franja capilar do solo.

O segundo é o aquífero totalmente confinado, limitado na parte superior e inferior por camadas impermeáveis de rocha. O SWAT considera que a água armazenada neste reservatório irá contribuir para uma bacia hidrográfica diferente da estudada, ou seja, a água que percola até o aquífero profundo não afetará na vazão do canal (NEITSCH et al., 2005). Desta forma, será abordado neste trabalho informações referentes ao aquífero raso devido à importância deste na simulação utilizando o SWAT.

O abastecimento do aquífero, bem como o escoamento lateral, só ocorrerá mediante a existência de percolação da água através do perfil do solo. Por sua vez, a percolação dar-se-á quando a umidade do solo exceder àquela correspondente a capacidade de campo (NEITSCH et al., 2005). A umidade na capacidade de campo é dada pela equação abaixo

$$FC_{ly} = WP_{ly} + AWC_{ly} \quad \text{Eq.11}$$

em que FC_{ly} é a umidade do solo na capacidade de campo, adimensional; WP_{ly} é a umidade do solo no ponto de murcha, adimensional e AWC_{ly} é a capacidade de água disponível na camada do solo, adimensional. O AWC_{ly} é denominado de parâmetro Sol_awc e seu valor é definido pelo usuário.

O balanço hídrico no aquífero raso é dado pela equação a seguir

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - W_{revap} - W_{pump,sh} \quad \text{Eq. 12}$$

em que $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero em um dia i qualquer, mm; $aq_{sh,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero em um dia $i-1$, mm; $w_{rchrg,sh}$ é a quantidade de água que abastece o aquífero no dia i qualquer, mm; Q_{gw} é o fluxo de base que entra no canal no dia i qualquer, mm; W_{revap} é a quantidade de água que retorna a franja capilar através do revap, mm e W_{pump} é a quantidade de água retirada do aquífero por bombeamento, mm.

A quantidade de água que abastece o aquífero raso é dado pela equação 13.

$$W_{rchrg,i} = \left(1 - \exp \left[-\frac{1}{\delta_{gw}} \right] \right) \cdot w_{seep,i} + \exp \left[-\frac{1}{\delta_{gw}} \right] \cdot w_{seep,i-1} \quad \text{Eq.13}$$

em que $W_{rchrg,i}$ é a quantidade de água entrando no aquífero no dia i qualquer, mm; δ_{gw} é o tempo de drenagem da formação geológica, conhecido como parâmetro Gw_delay, dias; $w_{seep,i}$ é a quantidade de água que existe na base do perfil do solo no dia i , mm e $w_{seep,i-1}$ é a quantidade de água que entra no aquífero no dia $i-1$, mm.

O fluxo de base é definido como o volume de fluxo fluvial originado a partir da água presente no aquífero raso (SARMENTO, 2010). O fluxo de base irá ocorrer apenas quando a água armazenada no aquífero exceder o valor limite especificado pelo usuário, denominado $Gwqmn$ e representado por $aq_{shthn,q}$. O fluxo de base é calculado no SWAT utilizando a equação:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + W_{rchrg,sh} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad \text{Eq.14}$$

$$\text{Se } aq_{sh} > aq_{shthn,q} \quad \text{e}$$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad \text{se } aq_{sh} \leq aq_{shthn,q}$$

em que $Q_{gw,i}$ é o fluxo de base contribuindo no canal no dia i qualquer, mm ; $Q_{gw,i-1}$ é o fluxo de base no canal principal no dia $i-1$ qualquer, mm; α_{gw} é a constante de recessão do fluxo de base, conhecido como o parâmetro Alpha_bf, adimensional; Δt é a variação de tempo, dia; $W_{rchrg,sh}$ é a quantidade de água entrando no aquífero no dia qualquer i , mm; $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero em um dia i qualquer, mm e $aq_{shthn,q}$ é o valor limite do nível de água no aquífero, definido pelo usuário para que ocorra o fluxo de base, mm.

A movimentação da água do aquífero raso para o perfil do solo para atender a demanda hídrica decorrente do processo de evaporação ou absorção pelas raízes das plantas é denominado de revap. A quantidade máxima de água que pode ser retirada do aquífero por meio do revap é dada pela equação:

$$W_{revap,mx} = \beta_{rev} \cdot E_o \quad \text{Eq. (15)}$$

em que $W_{revap,mx}$ é a quantidade máxima de água que penetrou na zona do solo em resposta ao déficit hídrico, mm; β_{rev} é o coeficiente revap, também denominado de Gw_{revap} , adimensional e E_o é a evapotranspiração potencial, mm.

No SWAT, o processo de revap só ocorrerá se a quantidade de água no aquífero raso for maior que o limite definido pelo usuário durante o processo de calibração do modelo. Esse limite é dado pelo parâmetro $aq_{shthr,rvp}$, chamado de revapmn (NEITSCH et al., 2005). Portanto, a quantidade real de água retirada pelo revap que ocorrerá em determinado dia será calculada pelas equações abaixo:

$$W_{revap} = 0 \quad \text{se } aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad \text{Eq. 16}$$

$$W_{revap} = w_{revap,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad \text{se} \quad \text{Eq. 17}$$

$$aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx})$$

$$w_{revap} = w_{revap,mx} \quad \text{se } aq_{sh} \geq (aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx}) \quad \text{Eq. 18}$$

em que W_{revap} é a quantidade de água que penetra na zona do solo, mm; $a_{q_{\text{sh}}}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso, mm; $a_{q_{\text{shthr,rvp}}}$ é a quantidade mínima de água no aquífero para ocorrer revap, mm e $w_{\text{revap,mx}}$ é a quantidade máxima de água que penetrou na zona do solo, mm.

3.3.4 Estudos utilizando o modelo SWAT

Devido a robustez apresentada, o uso do SWAT aumentou com o passar dos anos. Tal fato explica-se pela capacidade do modelo em fornecer direcionamentos sobre os efeitos que as mudanças climáticas, influencia antropogênica e outros fatores que impactam os recursos hídricos (GASSMAN, 2007).

Coffey et al. (2010) afirmam que o SWAT é um modelo dinâmico que pode ser aplicado em qualquer bacia hidrográfica e utilizado para prever o impacto das práticas de uso e manejo do solo na qualidade de água e produção de sedimentos ao longo de um período de tempo contínuo.

Panhalkar (2013) estimou o escoamento superficial na bacia do rio Satluj localizada na Índia com o SWAT para um período de 30 anos. Os mapas de classe e uso do solo foram produzidos com ferramentas de SIG. O resultado deste estudo demonstra que o modelo tem boa representatividade e que o mesmo pode ser utilizado como uma excelente ferramenta de gestão dos recursos hídricos.

Fukunaga et al. (2015) utilizando o SWAT para avaliar a vazão no alto Itapemirim entre os anos de 1993 até 2000 observaram que o SWAT proporcionou melhores resultados para vazões mínimas e médias do que para os picos. Contudo, concluíram que a partir do modelo é possível simular adequadamente vazões em bacias tropicais com baixa disponibilidade de dados meteorológicos.

Vários tem sido os estudos com o SWAT em todo o mundo e muitos deles estão disponíveis na página do desenvolvedor, listando mais de 2200 publicações. No Brasil a aplicação do modelo aumentou nos últimos anos, mas ainda carece de melhor base de dados para a prática de procedimentos de modelagem mais adequada a realidade nacional (BRESSIANI et al., 2015).

Aplicando o SWAT para simular o escoamento na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, afluente do rio Piracicaba, em SP para os anos de 1999 e 2000, Machado et al. (2003) indicaram que o modelo apresentou boa representatividade entre os dados observados e

simulados com desvio padrão de -0,7%, onde o sinal negativo indica que os valores simulados superaram os observados. Sendo assim o mesmo pode ser utilizado na escolha da prática de conservação ambiental a ser utilizada para controlar a perda de sedimentos.

Balssinera (2005) simulou as vazões líquidas mensais na bacia do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil, com o SWAT e concluiu que o modelo apresentou aplicação satisfatória para as condições da região atribuindo a dificuldade em simular o fluxo de base a limitada base de dados pedológicos e distribuição espacial dos solos. Durães et al. (2011) simulando o comportamento hidrológico da bacia do rio Paraopeba, estado de Minas Gerais, afirmaram que é uma ferramenta útil para o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Segundo Castro (2013), utilizando o SWAT no bioma Caatinga, apesar de algumas limitações, principalmente na etapa de validação do modelo, o modelo é passível de utilização para simulação de vazões diárias. Contudo, a aplicação do SWAT depende da informação necessária para gestão dos recursos hídricos e da calibração bem realizada.

Bressiani et al. (2015) fizeram revisão sobre a aplicação do SWAT no Brasil entre os anos de 1999 e 2013 incluindo todos os tipos de publicações totalizando 102 trabalhos. As regiões sul e sudeste do Brasil são as que mais realizaram pesquisas com o SWAT. De acordo com os autores, a região nordeste apresenta grande necessidade de estudos pelas questões climáticas e espaciais, contudo ainda é uma área pobre de disponibilidade de dados.

Desta forma, o SWAT tem possibilidades de aumentar ainda mais sua aplicação no Brasil, principalmente em regiões que carecem de melhor gestão dos recursos hídricos. Entretanto, é nítido que há necessidade de melhorias nas disponibilidades de bases de dados de qualidade para maior sucesso no processo de modelagem.

3.4 Análise de sensibilidade do modelo

Antes da realização da calibração e validação do modelo é recomendado determinar os parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica em estudo. Este procedimento é denominado de análise de sensibilidade, a qual determina a taxa de mudança na variável de saída do modelo decorrente alteração dos parâmetros de entrada.

O objetivo principal da análise de sensibilidade é identificar parâmetros chaves para realizar a calibração do modelo (ARNOLD et al., 2012). Uma vez identificados os parâmetros mais relevantes, a calibração do modelo é realizada com mais atenção aos valores destes,

garantindo melhor estimativa dos valores modelados e evitando desperdício de tempo (LENHART et al., 2002; ARAGÃO et al., 2013).

O SWAT realiza a análise de sensibilidade pelo algoritmo LH-OAT (Griensven et al. 2006), semelhante ao método proposto por Morris (1991), exceto quanto a forma de amostragem. Neste método de análise a amostragem de Monte Carlo foi substituída pelo Latin – hypercube simulations (LH), método tão robusto quanto o tradicional, mantendo a abordagem OAT.

O LH (McKAY et al., 1979; McKAY, 1988) é um procedimento de amostragem baseado no método de Monte Carlo, porém mais particionado. No método LH o domínio de cada parâmetro P é subdividido em “ n ” intervalos ΔP_y ($y= 1, 2, \dots, n$) com probabilidade de ocorrência $1/n$ igual para todos ΔP_y . Após a subdivisão, realiza-se amostragem aleatória de um ΔP_y onde cada intervalo pode ser selecionado apenas uma vez durante análise de sensibilidade (Griensven et al. 2006).

Realizada a amostragem em um loop, assim como proposto por Morris (1991), a abordagem OAT é utilizada para fazer análise de sensibilidade do parâmetro. Nesta abordagem, os valores de um único parâmetro são alterados dentro dos limites do intervalo ΔP_y amostrado pelo LH. Essa variação ocorre em percentual f_i do domínio do parâmetro definido pelo usuário. Como apenas um parâmetro é alterado por vez, as mudanças no resultado do modelo nesta rodada é atribuído exclusivamente a ele, sendo obtido seu efeito parcial do parâmetro. O mesmo procedimento acontece com os demais parâmetros para o intervalo ΔP_y amostrado.

O método LH- OAT funciona por ciclos. Terminada a análise de sensibilidade com a abordagem OAT dentro do intervalo ΔP_y , é realizada uma nova amostragem e o processo é repetido até que o domínio de todos os parâmetros tenha sido selecionados, sendo necessária a execução do modelo (run) $n*(P+1)$ vezes. Ao fim de todos os ciclos a sensibilidade do parâmetro é dada pela média dos efeitos parciais de cada parâmetro (Sarmiento, 2010; Griensven, 2002; Griensvan et al., 2012). O efeito parcial do parâmetro é calculado pela Equação 19.

$$S_{ij} = \frac{\frac{M(P_1, P_i \cdot (1 + f_i), \dots, x_p) - M(P_1, P_i, \dots, P_p)}{M(P_1, P_i, \dots, P_p)}}{\frac{P * (1 + f_i)}{P_i}} \quad \text{Eq. 19}$$

em que $M(P_1, P_i, \dots, P_p)$ é o resultado do modelo executado com os valores padrões definidos pelo desenvolvedor $M(P_1, P_i \cdot (1 + f_i), \dots, x_p)$ é o resultado do modelo executado com o

parâmetro alterado; f_i é a fração pela qual cada parâmetro P_i é alterado (uma constante predefinida) e j se refere ao intervalo LH (Griensven et al., 2006).

A interpretação dos índices deve ser feita a partir dos valores absolutos, onde quanto maior o valor índice calculado maior a sensibilidade do modelo ao parâmetro de entrada. Os sinais positivos e negativos indicam se o efeito na variação do parâmetro de entrada é diretamente ou inversamente proporcional a variação da variável resposta, respectivamente.

A classificação dos parâmetros em níveis de sensibilidade envolve subjetividade. Para Feyereisen et al. (2007) um parâmetro sensível é aquele que apresenta um índice maior que 0,10. Griensven et al. (2006) classificam em ranking atribuindo ao de maior sensibilidade a posição 1 e ao de menor posição igual ao número de parâmetros analisados.

3.5 Calibração e validação

A calibração de modelos corresponde a etapa da modelagem onde é realizada, dentro de faixa aceitável de valores, a parametrização adequada do modelo. Durante a calibração os parâmetros do modelo são ajustados com o objetivo de aproximar o máximo possível a variável simulada da observada em campo, garantindo representação adequada do local de estudo (ARNOLD et al., 2012). Uma boa calibração permite ao pesquisador utilizar o modelo para inferir informações sobre a bacia hidrográfica estudada sem cometer graves equívocos.

Antes de realizar a calibração deve-se executar o modelo em um período anterior de forma a reduzir as incertezas encontradas no início das simulações decorrentes do desconhecimento das condições iniciais (ANDRADE et al., 2013). Esta etapa é denominada de aquecimento do modelo, também chamada de período de equilíbrio.

O período de aquecimento é importante para reduzir a instabilidade proveniente do processo de crescimento vegetal, umidade inicial do solo e armazenamento de água no aquífero. Nesse período os dados de saída são desconsiderados para os cálculos das médias anuais das variáveis de saída e não são utilizados para a calibração e validação do modelo.

Neto (2011) realizou teste submetendo o SWAT a um mesmo evento de precipitação diversas vezes e verificou que o modelo se comporta de forma bastante discrepante no primeiro ano de simulação. Sarmiento (2010) chama este problema de erro de inicialização.

Segundo Arnold et al. (2012), em simulações curtas o período de aquecimento torna-se ainda mais importante. Para simulações de cinco anos ou menos, é necessário que haja pelo menos um ano de aquecimento.

Embora seja necessário um período de aquecimento do modelo, não há consenso quanto a parcela da série de dados a ser utilizado para esta finalidade. Niestch (2005) afirma que em trabalhos onde o período de simulação seja inferior a 5 anos é necessário a utilização de pelo menos um ano de aquecimento.

Após o período de aquecimento é de fato realizada a calibração dos parâmetros. Tal procedimento pode ser realizado de forma manual ou automática. Na forma manual, também denominada de tentativa e erro, o usuário testa diferentes conjuntos de parâmetros e compara os dados simulados com os observados a partir de hidrogramas (PEREIRA, 2013). Os resultados da calibração manual dependem da experiência do usuário do modelo, sendo a eficiência quantificada a partir da análise estatística ao fim do procedimento.

A maior complexidade dos modelos hidrológicos fez da calibração manual uma prática mais complexa e altamente trabalhosa. As dificuldades associadas a calibração manual levou ao desenvolvimento de técnicas automáticas de calibração que utilizam algoritmos para ajustar os dados simulados aos observados (VAN LIEW et al., 2005).

O SWAT a partir da versão 2003 procede a calibração automática com o método desenvolvido por Van Griensven e Bauwens (2003) denominado Parasol. Basea-se no Shuffled Complex Evolution Algorithm (SCE-UA) (DUAN et al., 1992), algoritmo robusto e eficaz ao mesmo tempo que é eficiente e flexível, e utiliza apenas uma função objetivo.

A função objetivo indica o desvio entre a série de dados observados e simulados (GUPTA et al., 1999). Quanto menor o valor da função objetivo maior aproximação entre os simulados e observados, assim, o algoritmo SCE-UA buscará os valores dos parâmetros na tentativa de minimizar a função objetivo.

A Soma do Quadrado do Resíduo (SSQ), apresentada na Equação 20, é uma função objetivo amplamente utilizada como pode ser consultado nos trabalhos de realizados por Sarmento(2010), Van Griensven e Bauwens (2003) e Van Liew et al. (2005).

$$SSQ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,est})^2 \quad \text{Eq. 20}$$

em que n é número de pares de dados medidos e observados; $Q_{i,obs}$ é a variável observada e $Q_{i,est}$ é a variável estimada.

O SCE-UA combina as potencialidades de outros métodos existentes. No loop inicial realiza-se amostragem aleatória de uma população inicial S em toda a faixa viável de P parâmetros e em seguida calculado o valor da função objetivo para cada S . As populações são então ordenadas de acordo com o valor da função objetivo sendo o menor colocado na primeira posição e o maior na última. Cada população inicial é particionada em várias comunidades com $2P + 1$ pontos e evoluem conforme o método Simplex (NELDER e MEAD, 1965) de forma independente. Após evoluídos, as população é embaralhada e ordenadas de acordo com os valores da função objetivos. Se o critério de parada não foi alcançado, vários outros loops serão conduzidos (VAN LIEW, 2005).

A autocalibração utilizando o SCE-UA é uma ferramenta com auto potencial que pode ser utilizada para reduzir o tempo de calibração e incertezas associadas à modelagem (VAN LIEW et al., 2005).

Realizada após a calibração, a validação é utilizada para demonstrar a capacidade do modelo em reproduzir de forma suficientemente precisa o comportamento de determinada bacia hidrográfica para a variável escolhida. Esta etapa consiste em executar o modelo com os valores dos parâmetros obtidos durante a calibração, comparando o resultado com dados observados em período diferente (ARNOLD et al., 2012).

A validação é uma avaliação mais criteriosa do modelo, pois durante esta etapa os parâmetros não podem ser ajustados para obter melhores resultados, como ocorre durante a calibração (BENAMAN et al., 2005). Essa avaliação do modelo fora do período de ajuste dos parâmetros, torna a validação uma etapa importante para avaliar a acurácia do modelo.

Não existe regra para a escolha do período para validar o modelo. Alguns autores utilizam o período seguinte a calibração, mas vários outros fazem em períodos anteriores ou distantes do utilizado na calibração. Exemplos de estudos em que a calibração do modelo é realizado em período anterior a calibração são os realizados por, UFBA (2004), Singh et al. (2004), Schoul et al. (2007), Feyereisen et al. (2007) e Abell e Hamilton (2015).

3.6 Produção de água

A produção de água é um dos mais importantes componentes ambientais a ser estimado para um eficiente planejamento e gestão dos recursos hídricos (ADEOGUN et al., 2014). Ela pode ser definida como a quantidade de água que efetivamente contribui para a vazão no canal durante um intervalo de tempo (ARNOLD et al., 2011).

Pelo fato da movimentação da água impactar em vários aspectos nas bacias hidrográficas, tais como crescimento das plantas, movimento de sedimentos, pesticidas e nutrientes, é importante estudar a produção de água e seus contribuintes para uma gestão adequada dos recursos hídricos (ARNOLD et al., 2012). Segundo Adeogun et al. (2014) a compreensão dos componentes hidrológicos e sua variação espacial poderia ser um instrumento auxiliar para os gestores no desenvolvimento de estratégias para conservação da água.

Conforme Sithian e Syamala (2009), os elementos mais importantes no estudo do balanço hídrico e produção de água consistem na precipitação, escoamento superficial, fluxo lateral, fluxo de base e evapotranspiração. Com exceção da precipitação, os demais elementos devem ser estimados por ferramenta de modelagem apropriada, devido à dificuldade na medição (ADEOGUN et al., 2014).

Rodrigues et al. (2015) evidenciaram em trabalho realizado na bacia do Rio Pará a eficiência da modelagem ambiental na simulação da produção de água. Os autores utilizaram o SWAT e concluíram que o modelo considerou de forma adequada as variáveis envolvidas na produção de água sendo eficaz na representação da bacia hidrográfica, gerando resultados coerentes com a distribuição espacial e temporal.

Lopes (2008) utilizando o modelo SWAT em sete bacias experimentais no norte do estado de Santa Catarina concluiu que a partir das simulações foi possível identificar qual sub-bacia produziu maior quantidade de água. Brito et al. (2014) simulando a produção de água com o SWAT na sub-bacia do rio Sangradouro puderam concluir que a quantidade de água existente poderá ser insuficiente para abastecer a demanda para agricultura e demais usos múltiplos.

O modelo SWAT permite simular a produção de água em bacias hidrográficas. A produção de água no modelo, em termos de lâmina, é estimada em nível de bacia, sub-bacia ou HRU sendo obtida por meio da equação 21.

$$W_{prod} = Q_{sup} + Q_{lat} + Q_{gw} - T_{loss} \quad \text{Eq.21}$$

em que W_{prod} é a quantidade de água produzida, mm; Q_{sup} é a contribuição do escoamento superficial, mm; Q_{lat} é a contribuição do escoamento lateral, mm; Q_{gw} é a contribuição do escoamento subterrâneo, mm e T_{loss} são as perdas de transmissão em canais tributários ou por percolação na sub-bacia, mm.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas informações meteorológicas, variáveis físicas do solo, cobertura do solo e características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. As informações referentes à bacia foram utilizadas para modelagem hidrológica visando a estimativa da vazão e proceder a análise do balanço hídrico em diferentes sub-bacias do rio Catolé Grande. Para tanto foi utilizado o modelo *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT), devidamente calibrado e submetido à processo de validação visando a modelagem da produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

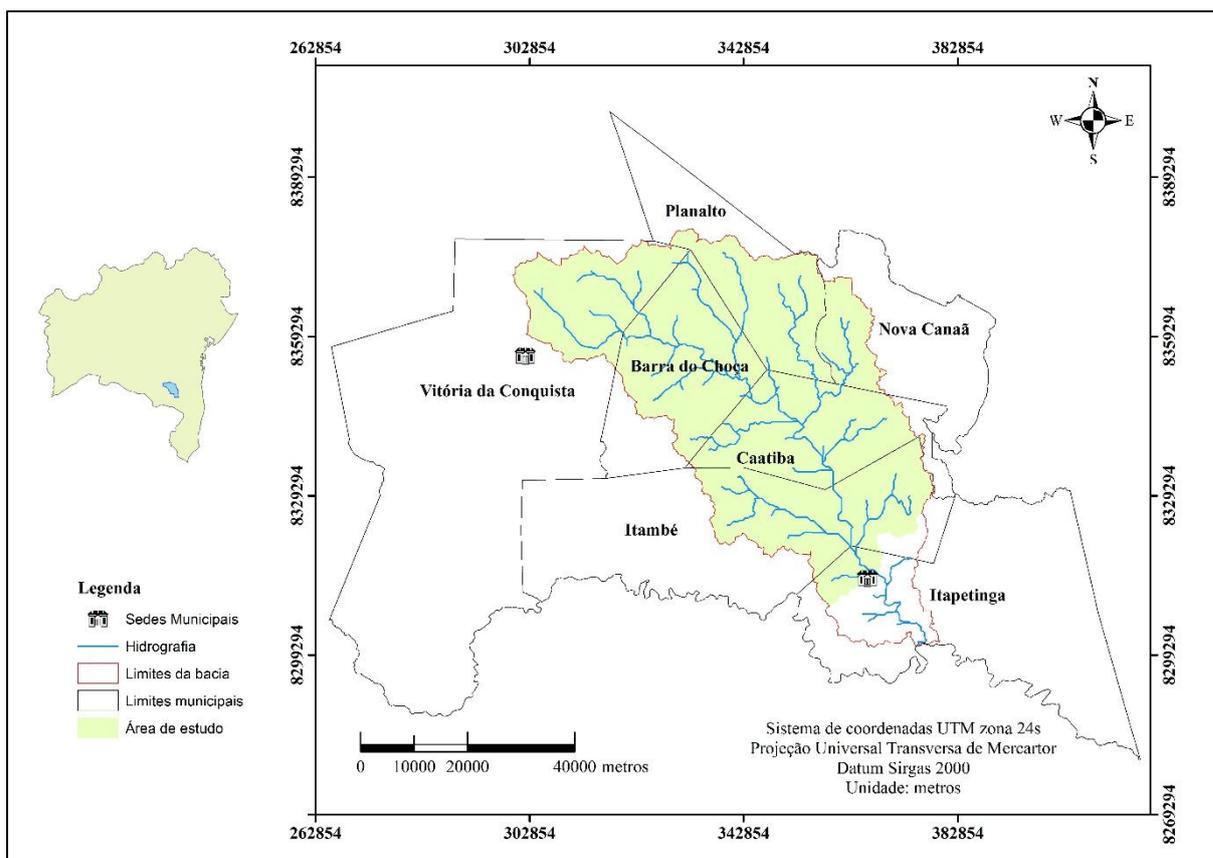
4.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Catolé Grande é sub-bacia do rio Pardo, pertencente à região hidrográfica do Atlântico Leste. O rio Catolé localiza-se no nordeste brasileiro, na região sudoeste do estado da Bahia cuja nascente está situada na região do Planalto da Conquista. A bacia do Catolé está inserida entre os meridianos 299594 e 3795604 m e paralelos 8300891 e 8379536 m na projeção UTM zona 24 e referencial geodésico Sirgas 2000, (Figura 3).

A bacia do Catolé Grande possui área de drenagem de 3127,77 km² distribuída entre os municípios de Barra do Choça (19,34%), Caatiba (18,58%), Itambé (19,40%), Itapetinga (9,51%), Nova Canaã (5,62%), Planalto (13,32%) e Vitória da conquista (14,23%).

Com 2884,14 Km², a área de estudo não abrangeu a totalidade da bacia hidrográfica do Catolé, representando 91,7% da mesma. Ela foi delimitada a partir da estação de monitoramento fluviométrico (53780000) localizada no município de Itapetinga, de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA), sendo essa a mais próxima da foz do rio Catolé Grande (Figura 3).

Figura 3: Mapa da localização geográfica da área de estudo.



4.2 Dados de entrada para o modelo SWAT

4.2.1 Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente - MDEHC

O MDEHC da área de estudo foi gerado a partir de imagens SRTM obtidas na plataforma da web do United State Geological Survey (USGS) com resolução espacial de 30 m, e processado com o software ArcGis. O MDEHC foi consistido com o auxílio da hidrografia disponibilizada pela Agência Nacional das Águas (ANA) no portal HidroWeb com intuito de minimizar erros na delimitação da área de drenagem e dos cursos d'água. A partir do MDEHC foi delimitada a bacia hidrográfica e a área de estudo e obtida a declividade e altimetria.

Na Figura 4 é apresentado o mapa de elevação da área de estudo. Conforme pode ser observado, as altitudes variam desde 251 no ponto de monitoramento até a cota mais elevada da Bacia hidrográfica do Catolé Grande com valor de 1129 m. A estação fluviométrica considerada neste trabalho está localizada a 251 m.

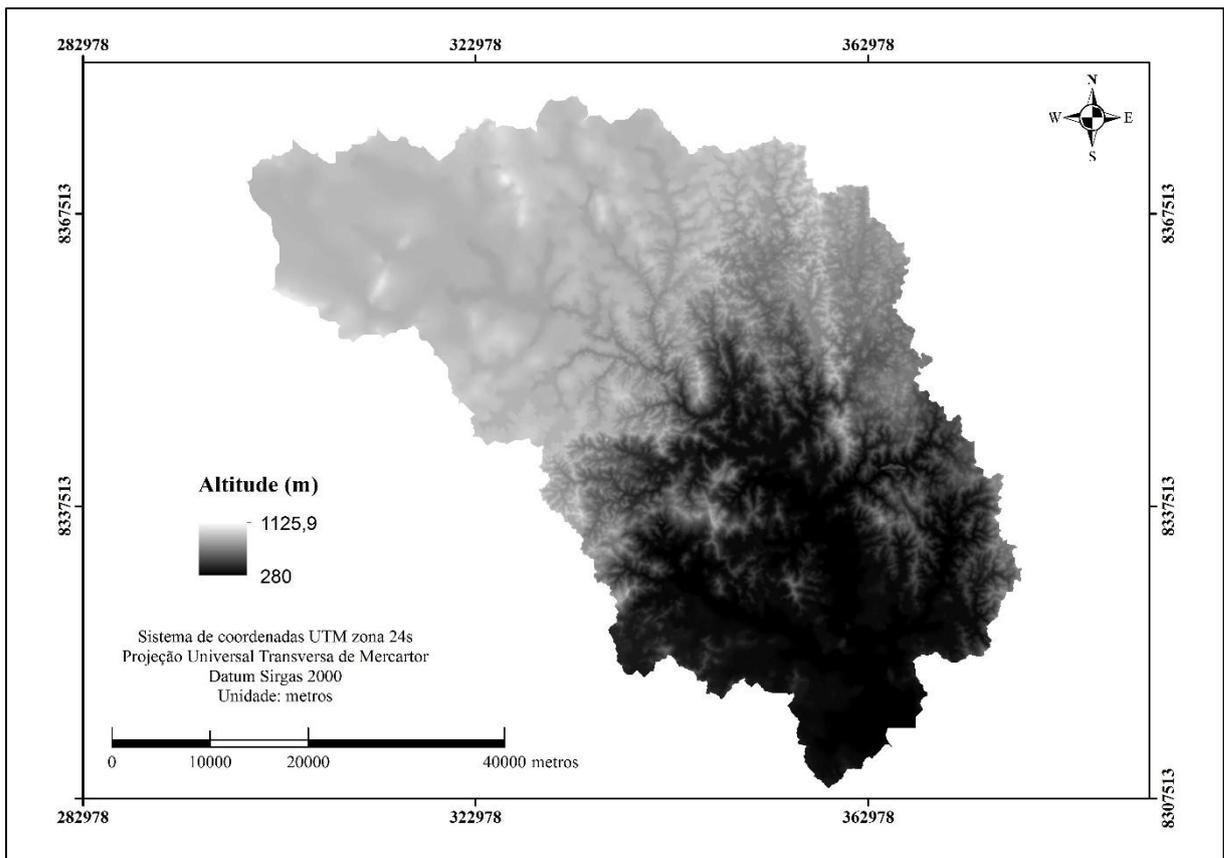


Figura 4: Mapa de elevação da área de estudo.

4.2.2 Classes de solo da área de estudo

O mapa das classes de solo da área de estudo foi disponibilizado pela Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) que, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) realizou a classificação do solo de toda região sudeste da Bahia.

Na bacia do rio Catolé Grande são encontradas as seguintes classes de solo: Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, Chernossolo Argilúvico Órtico típico, Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico abrupto e Nitossolo Háptico Eutrófico férrico saprolítico (Figura 5).

O Latossolo que compõe 51,52% do solo da área de estudo, são solos originados de rochas e sedimentos, constituídos de material mineral bastante intemperizados e profundos. Caracterizam-se pelo início do horizonte B latossólico, logo em seguida de qualquer tipo de horizonte A, cerca de 200 a 300 cm da superfície (EMBRAPA, 2006). São solos influenciados

por altas temperaturas e umidade sendo susceptíveis a erosão, mas passíveis de manejo (PIGNARATO NETTO, 2008).

Representando 46,76% da área de estudo, o Chernossolo Argilúvico Órtico típico são solos que normalmente não apresentam coloração intensa, variam de bem a imperfeitamente drenados e dependem da formação e persistência de horizonte superficial em matéria orgânica e saturado por bases, principalmente cálcio e magnésio (EMBRAPA, 2006).

O Argissolo apresenta transição entre o horizonte A e B bastante clara onde nota-se grande incremento no teor de argila de atividade baixa entre essas duas camadas. Na camada mais superficial a textura varia de arenosa a argilosa e a seguinte de média a muito argilosa. Apresentam uma profundidade variada podendo ser de bem a imperfeitamente drenado (EMBRAPA, 2006). Dentro da área de estudo aparece como a terceira classe dominante com 1,22% dos solos do local. Nitossolos representam a menor parcela dos solos do local de estudo com 0,50%. São solos formados por material mineral, com horizonte B nítico abaixo do horizonte A, alto teor de argila (maiores que 350g/kg) com atividade baixa e são de moderadamente ácidos a ácidos (EMBRAPA, 2006).

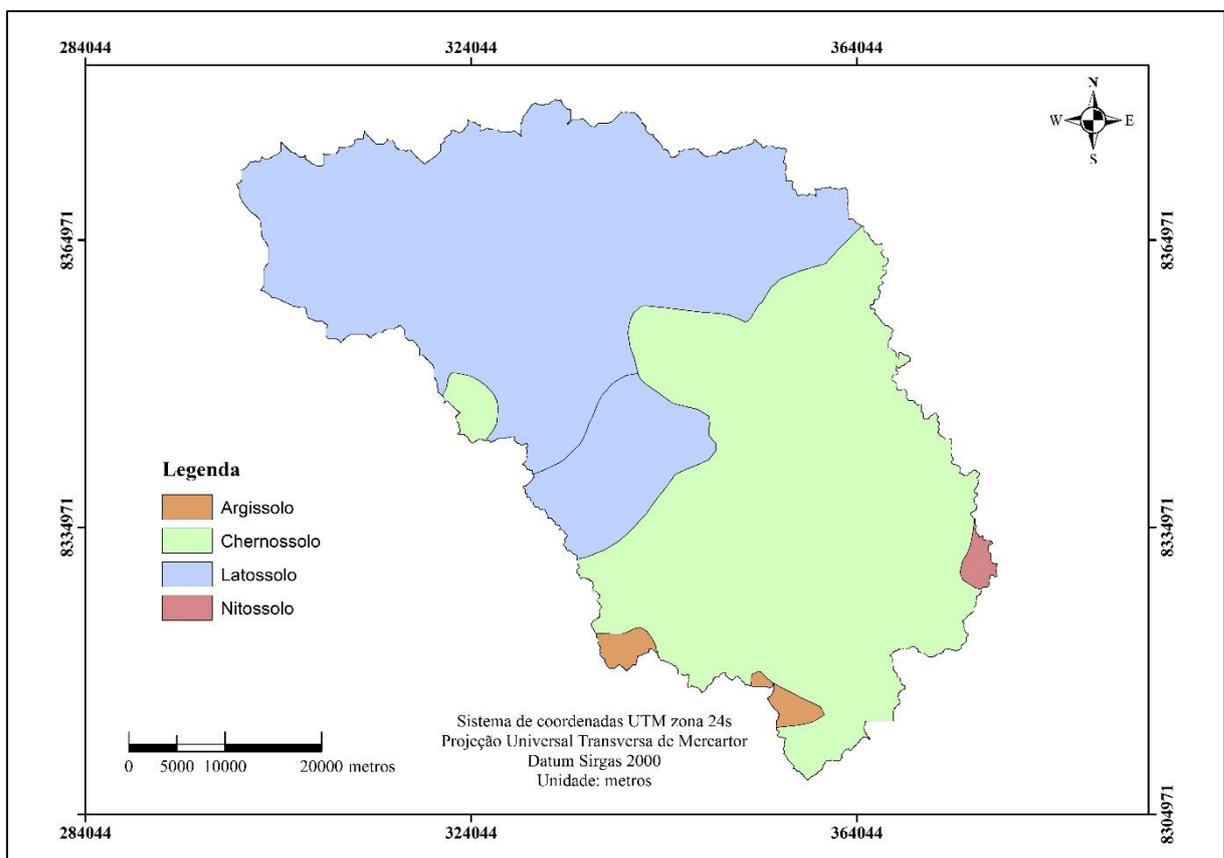


Figura 5: Mapa de tipo de solo da área de estudo.

4.2.3 Uso e ocupação do solo do da área de estudo

O mapa de uso e ocupação do solo foi gerado utilizando o módulo de classificação de imagens disponível no ArcGIS®, adotando a técnica conhecida como classificação supervisionada. Este método é utilizado quando há o prévio conhecimento da área de estudo, a fim de proceder a classificação com as classes definidas pelo analista (MENESES e ALMEIDA, 2012). Nesta etapa da pesquisa foi realizada a amostragem de treinamento em imagem de satélite Landsat 5, órbita 216 linhas 70 e 71 disponibilizada pelo USGS. O mapa com os usos do solo na área de estudo pode ser visualizado na Figura 6.

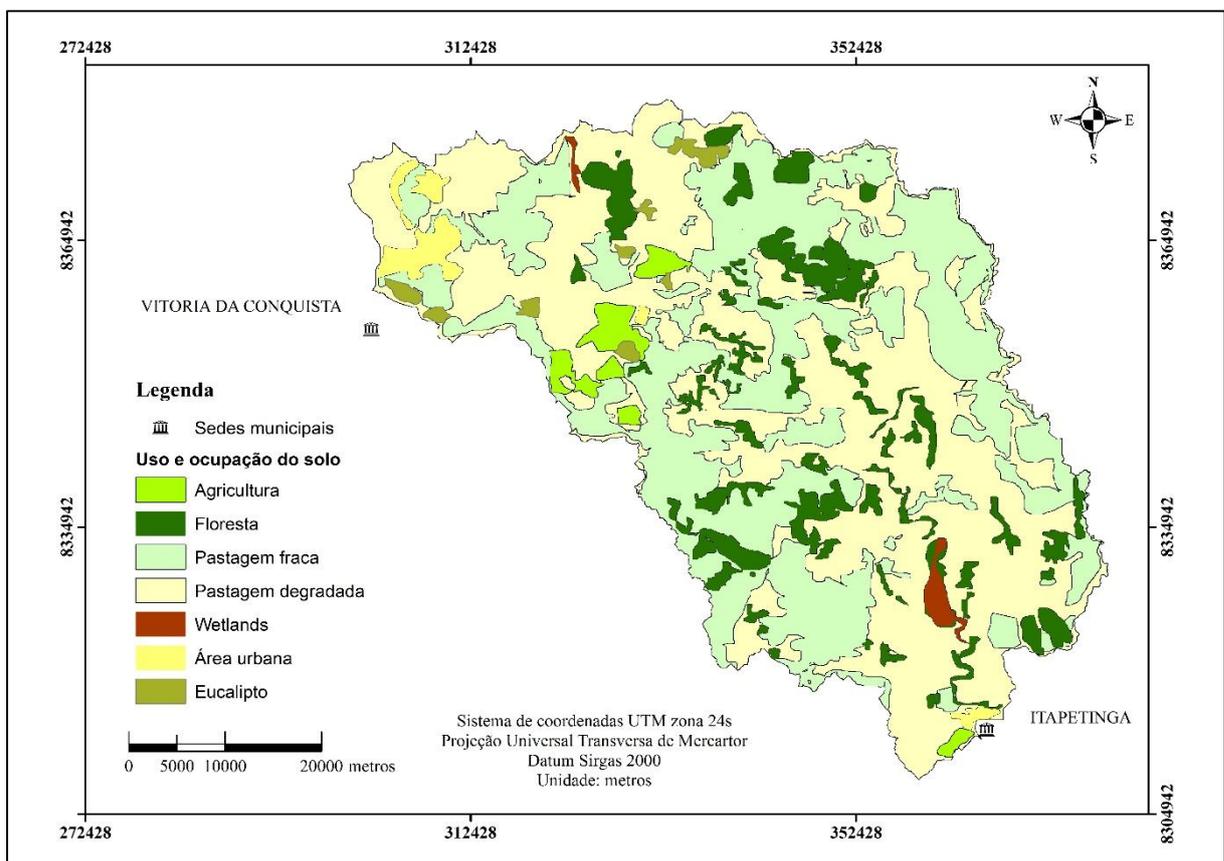


Figura 6: Mapa de uso de solo na área de estudo.

A bacia hidrográfica do rio Catolé Grande destaca-se pela grande atividade pecuária na região, a qual se expandiu em meados do século XX nos municípios de Itapetinga e Itambé, levando ao desmatamento de áreas de florestas nativas para serem utilizadas como pastagem (LIMA e PINTO, 2011). Posteriormente, houve expansão da pecuária para outros municípios que compõe a bacia do Catolé Grande, a qual vem sendo desenvolvida de forma extensiva. Tal

fato contribuiu para degradação da mata nativa resultando em uma cobertura de apenas 9,96% de toda área de estudo por remanescentes florestais.

As duas maiores áreas urbanas atendidas da bacia são as cidades de Vitória da Conquista e Itapetinga. A primeira é a terceira maior área urbana do estado segundo censo 2010 ficando atrás apenas de Salvador e Feira de Santana, transformando-se em um grande polo regional. A segunda representa um polo calçadista no estado com a instalação de indústria deste setor.

Nas regiões mais elevadas da bacia encontram-se, além das pastagens, áreas agrícolas incluindo, principalmente, o cultivo de café em Vitória da Conquista e Barra do Choça, e a silvicultura no Planalto da conquista.

4.2.4 Séries históricas de dados meteorológicos e vazão

Na modelagem hidrológica utilizando o SWAT são necessárias informações meteorológicas da região para realizar o balanço hídrico e simulação da vazão. Estes dados foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMet) e pela Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), ambos os órgãos vinculados ao Ministério da Agricultura, e Agência Nacional das águas (Figura 7).

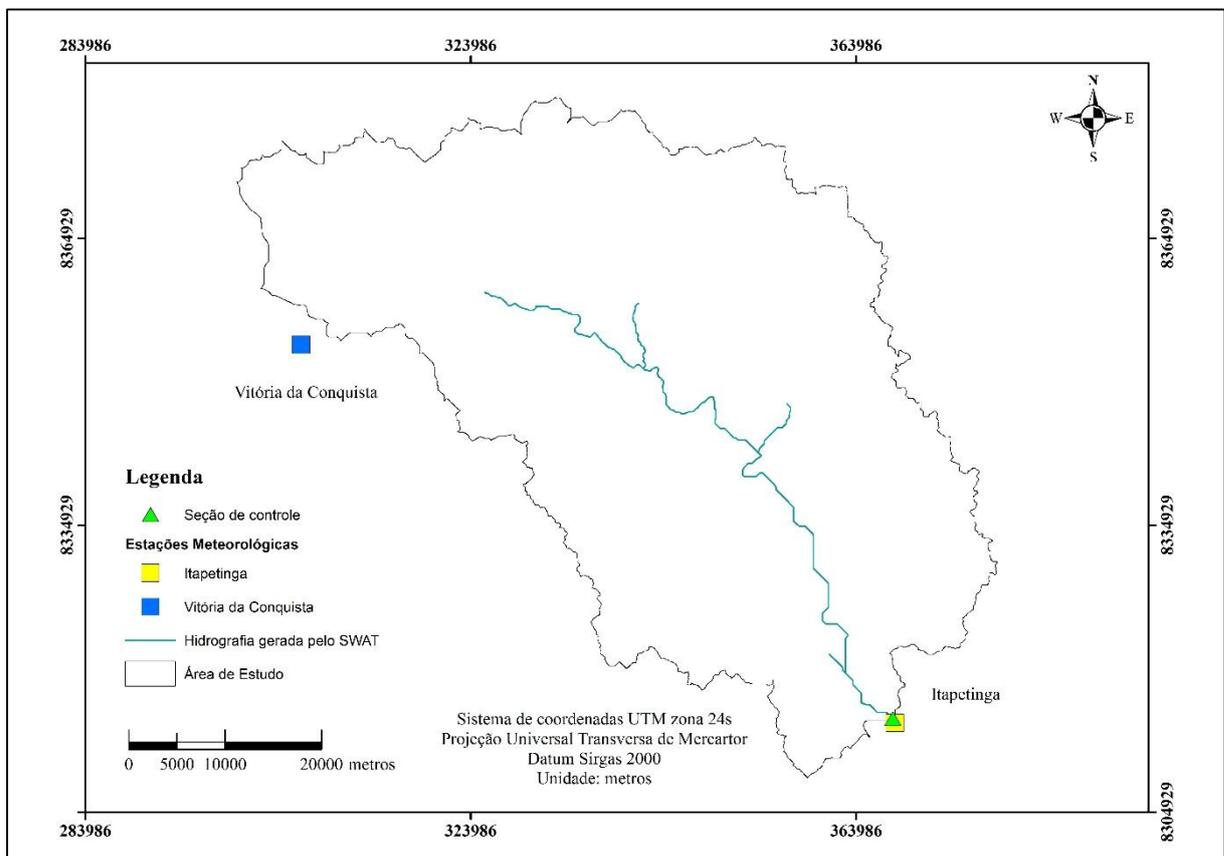


Figura 7: Localização das estações meteorológicas utilizadas para modelagem.

Assim, foram inseridos dados meteorológicos de precipitação, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperaturas máximas e mínimas correspondentes às estações OMM 86697, localizada no município de Vitória da Conquista, e OMM 86723, em Itapetinga. Estação de Vitória da conquista apresenta precipitação média anual de aproximadamente 804 mm, enquanto em Itapetinga a lâmina média anual precipitada é aproximadamente 897,32 mm (Figura 8).

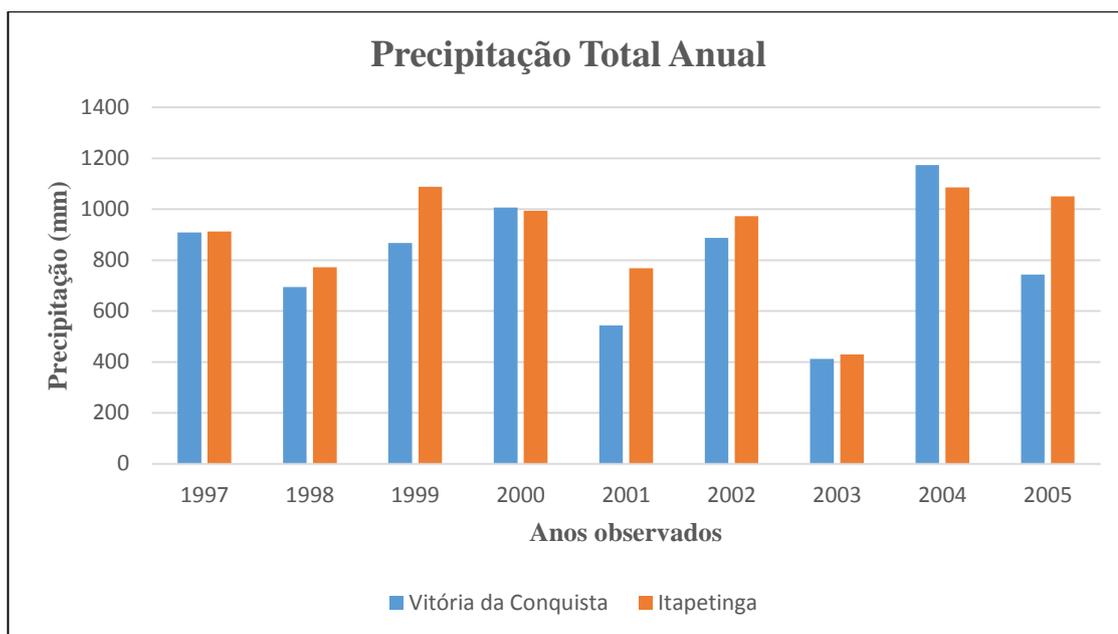


Figura 8: Precipitação total anual para o período observado.

A utilização destas estações é justificada pelo fato de serem as únicas com influência na bacia hidrográfica que estão disponíveis. As variáveis meteorológicas utilizadas foram séries diárias de radiação solar, temperaturas máximas e mínimas do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e precipitação para período de Janeiro de 1997 à Dezembro de 2005.

A série histórica de dados diários de vazão observada utilizada neste trabalho refere-se a estação n° 53780000 de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA) e fica localizada no município de Itapetinga. Esses dados foram obtidos a partir do portal HidroWeb vinculado à ANA. Tal como as variáveis meteorológicas, a série histórica de vazão foi de Janeiro de 1997 à Dezembro de 2005.

Para o preenchimento das falhas presentes na série histórica de dados meteorológicos, foi utilizada a técnica do método do Inverso do Quadrado da Distância, enquanto para vazão não foi necessário fazer preenchimento de falhas.

4.3 Entrada de dados no ArcSwat

Para que seja possível a modelagem com o SWAT é necessário dados topográficos, de classes do solo, de uso e cobertura do solo e meteorológicos. Os dados topográficos foram obtidos a partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente do terreno – MDEHC.

A resolução do MDEHC a ser utilizado na modelagem com o modelo SWAT depende do tamanho da bacia hidrográfica em estudo. De acordo com Melo Neto (2011) e Betrie (2010) a resolução de 30m é capaz de representar adequadamente a topografia de bacia hidrográficas, haja vista os resultados satisfatórios obtidos por tais pesquisadores aplicando o modelo.

O MDEHC foi utilizado para a definição da rede de drenagem e delimitação das sub-bacias. Para esse procedimento foi necessária identificação do exutório da bacia representado por um arquivo shapefile tipo ponto com coordenadas UTM zona 24 de 8314721,35 m S e 367795,64 m O.

O critério de 30000 ha, escolhido em função do tamanho da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande, foi utilizado para subdividir a área de estudo em 7 sub-bacias na barra de ferramentas do ArcSwat, opção “Watershed delineator”. Em estudo realizado para avaliar o efeito da subdivisão da bacia na simulação da vazão com o SWAT. Jha et al. (2004) concluíram que não houve interferência nesta variável de saída em função da divisão, oposto do que acontece na simulação de outras variáveis, tal como sedimentos.

Para a determinação dos parâmetros hidrológicos e produção de água em cada sub-bacia foi necessário fornecer características inerentes as propriedades e tipo de cobertura do solo. Essas informações são fornecidas por meio de mapas de classes e uso do solo. Tanto o mapa de uso como classe de solos podem ser inseridos no formato Raster ou shapefile, pois o SWAT possui compatibilidade com os dois tipos de arquivos.

No SWAT é permitida entrada de no máximo 5 classes de declividades na realização das simulações. Como EMBRAPA (2006) classifica o relevo em 6 classes de declividade, foi necessária a reorganização das classes de declividade tal como apresentado na Tabela 1.

Para a criação das Unidades de Resposta Hidrológica, foram sobrepostas informações das propriedades físicas do solo, uso do solo e declividade. Para a definição das HRU foi utilizado limites de 7% para tipo do solo, uso do solo e declividade, ou seja, classes que ocupam área inferior ao limiar não foram considerados para a criação das HRU.

Tabela 1: Classes de declividade usada na simulação com o modelo SWAT

Classes de declividade	Limites das classes (%)
1	0 – 5
2	5 – 10
3	10 – 20
4	20 – 40
5	Acima de 45

Este valor foi escolhido de acordo com a área da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Uzeika (2009) afirma que quanto menor o limite, maior capacidade do modelo em distinguir áreas com diferentes tipos, usos e manejos do solo.

Os dados meteorológicos diários observados de precipitação, temperaturas máximas e mínimas, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar de duas estações meteorológicas de Itapetinga e Vitória da Conquista foram utilizados como dados de entrada no modelo, os quais tem formato txt.

O modelo SWAT atribui a cada sub-bacia os dados meteorológicos com base na menor distância entre a estação de coleta dos dados e o centroide da sub-bacia. Desta forma, as sub-bacias 1, 2 e 3 utilizaram dados obtidos na estação de Vitória da Conquista enquanto as demais sub-bacias utilizaram os dados de Itapetinga.

A evapotranspiração foi obtida utilizando o método de Penman-Monteith descrito pela Equação 2 pelo fato de ser mais representativo e da disponibilidade dos dados exigidos para utilização do método. Neste trabalho utilizou-se o método da Curva Número SCS (Equação 6) para estimar o escoamento superficial.

Apesar das informações de entrada estarem em escala diária, a simulação foi realizada em escala de tempo mensal. Uma simulação com médias mensais apresentou níveis de detalhamento suficiente para atender o objetivo dessa pesquisa além de diminuir o tempo de processamento computacional. Após a discretização da Bacia hidrográfica do rio Catolé Grande e de inserir todos os dados de entrada necessários para a simulação da vazão, o modelo foi executado com os valores dos parâmetros iniciais padrão (default).

4.4 Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo

4.4.1 Análise de sensibilidade

Devido à complexidade e a grande quantidade de parâmetros calibráveis envolvidos na modelagem utilizando o SWAT, é necessário realizar análise de sensibilidade para encontrar os parâmetros de maior influência na simulação da vazão. Para realização deste procedimento foi

utilizada a ferramenta do próprio SWAT, que por meio do Algoritmo LH-OAT obtém os índices de sensibilidade para cada parâmetros para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2005.

A hierarquização dos parâmetros foi realizada a partir do resultado do índice de sensibilidade apresentado no arquivo de saída do SWAT denominado de Senseout e utilizando os critérios disponíveis em Lenhart et al. (2012). As classes e respectivas faixas de sensibilidade estão demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação de sensibilidade dos parâmetros

Classe	Índice	Sensibilidade
I	$0,00 \leq S_i < 0,05$	Baixa ou Desprezível
II	$0,05 \leq S_i < 0,20$	Média
III	$0,20 \leq S_i < 1,00$	Alta
IV	$1,00 \leq S_i$	Muito Alta

Foram utilizados 20 parâmetros para realização da análise de sensibilidade com o número de intervalos do LH igual a 20 e fração percentual de variação na abordagem OAT utilizada foi de 5%, totalizando 210 ciclos.

4.4.2 Calibração e validação

A calibração do modelo neste trabalho foi realizada de forma automática utilizando a técnica Parasol, a qual combina o algoritmo SCE-UA com a função objetivo Soma do Quadrado do Resíduo (SSQ) (Equação 20). O número máximo de interações utilizado para a calibração do modelo foi 8000 ciclos. O intervalo de confiança foi 95% mantendo a faixa de variação dos parâmetros como sugerido no próprio modelo. Após a realização da calibração os resultados são encontrados no arquivo de saída parasol.out e os valores dos parâmetros que acarretaram no melhor ajuste podem ser encontrado no arquivo de saída bestpar.

O período utilizado na calibração do modelo abrange janeiro de 2003 à dezembro de 2005. O ano de 2002 foi utilizado para aquecimento do modelo, haja vista que não há definição quanto à abrangência desse período e atendendo a exigência de Neitsch et al.(2005) de que haja no mínimo um ano para equilíbrio do modelo.

Para validar o modelo foi utilizado o período de janeiro de 1997 à dezembro de 2000. A escolha deste período foi realizado de forma aleatória e com base nos dados meteorológicos e fluviométricos disponíveis. Na validação o modelo foi executado com o arquivo bestpar, fazendo com que seja substituído os valores padrão por aqueles encontrados para a melhor calibração alterando somente o período.

Os parâmetros utilizados na simulação da vazão pelo SWAT estão apresentados na Tabela 3, bem como as respectivas descrições, valores *default* e limites de variação. Estes parâmetros são os comumente utilizados para análises de sensibilidade.

Tabela 3: Relação dos parâmetros passíveis de calibração no SWAT e suas respectivas faixas de alteração

Parâmetro	Descrição	Valor Default	Limites de variação
Alpha_bf	Constante de recessão do fluxo de base (dias)	0,048	0,0001 - 0,048
Biomix*	Eficiência da mistura biológica do solo	0,2	0,0 - 1,0
Blai	Índice de área foliar máximo ($m^2 m^{-2}$)	-	0,0 - 8,0
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)	-	0,0 - 10,0
Ch_k2	Condutividade hidráulica efetiva do canal ($mm h^{-1}$)	0,0	0,0 - 25,0
Ch_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal ($s m^{-1/3}$)	0,014	0,01 - 0,059
CN2*	Número da curva inicial para a condição de umidade AMCII	-	35,0-98,
Epc*	Fator de compensação do consumo de água pelas plantas	1,0	0,01 - 1,0
Esco*	Fator de compensação da evaporação da água do solo	0,95	0,01 - 1,0
Gw_delay	Intervalo de tempo para recarga do Aquífero (dias)	31,0	10 – 120
Gw_Revap*	Coefficiente de ascensão da água à zona de saturação	0,02	0,02 - 0,2
Gwqmn	Nível limite de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de base (mm)	0,0	0 – 5000
Revapmn	Profundidade limite da água no aquífero para ocorrência da ascensão da água para zonas não saturadas do solo (mm)	1,0	0 – 500
Slope	Declividade média da sub-bacia ($m m^{-1}$)	-	-
Slsbbsn	Comprimento médio da encosta (m)	-	-
Sol_alb*	Albedo do solo	-	-
Sol_awc	Capacidade de armazenamento de água no solo ($mm mm^{-1}$)	-	-
Sol_k	Condutividade hidráulica do solo ($mm h^{-1}$)	-	-
Sol_z	Profundidade da camada do solo (mm)	-	-
Surlag	Tempo de retardamento do escoamento superficial direto (dias)	4,0	0,05 – 24

(-) valores variam de acordo com HRU ou sub-bacia. *-Parâmetros adimensionais

4.5 Análise de desempenho do modelo SWAT

A avaliação da eficiência do modelo foi realizada utilizando método gráfico e determinação de índices estatísticos para as etapas de calibração e validação. O método gráfico consistiu na análise dos hietogramas e hidrogramas observado e simulado. As estatísticas utilizadas foram baseadas nas sugestões de Moriasi et al. (2007) que fizeram revisão de vários estudos e concluíram que o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliff (Nash e Sutcliff, 1970), o percentual de viés entre observados e simulados (Pbias) e o erro padrão médio normalizado (RSR) são suficientes para avaliar a acurácia do modelo.

O coeficiente de Nash-Sutcliff, Equação 22, descreve o desvio de 1 da razão do quadrado da diferença entre observados e simulados e a variância dos dados observados. Os valores podem variar desde $-\infty$ até o valor ideal de 1, em que 1 representa o ajuste entre observados e simulados. O coeficiente de Nash-Sutcliff é considerada ferramenta adequada para avaliar o comportamento da hidrográfa (SEVERET e DEZZERT, 1991). O coeficiente de Nash-Sutcliff é o comumente utilizado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos sendo obtido por meio da seguinte equação:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_m)^2} \right] \quad \text{Eq. 22}$$

em que NSE é o coeficiente de Nash-Sutcliff, adimensional; i é sequência temporal de pares observados e simulados; n é número de pares observados e simulados; Q_o é a vazão observada, $m^3 s^{-1}$; Q_s é a vazão estimada, $m^3 s^{-1}$; Q_m é a vazão média observada, $m^3 s^{-1}$.

O percentual de viés mede o desvio entre os dados observados e simulados, expresso em porcentagem. O valor ótimo de Pbias é 0,0 enquanto valores negativos e positivos indicam, respectivamente, a superestimação ou subestimação do modelo (GUPTA et al., 1999). Assim como o Nash-Sutcliff, o Pbias é bastante utilizado nas simulações realizadas com o SWAT devido a habilidade de indicar claramente um desempenho fraco do modelo (MORIASI et al., 2007). O Pbias é calculado conforme equação a seguir:

$$P_{\text{bias}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)}{\sum_{i=1}^n Q_o} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. 13}$$

em que P_{bias} é a porcentagem de viés, (%); i é sequência temporal de pares observados e simulados; n é número de pares observados e simulados; Q_o é a vazão observada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e Q_s é a vazão simulada, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

O erro padrão médio normalizado, RSR, é resultado da padronização da raiz quadrada do erro médio, RMSE, utilizando o desvio padrão dos dados observados. Ele é indicado para avaliar modelos pois combina um índice de erro com o desvio padrão propostas por Legados e McCabe (1999). O RSR é calculado através da razão entre o RMSE e o desvio padrão dos dados observados, DV_o , como descrito na Equação 24. O valor ideal do RSR é zero, indicando a inexistência de erros, e varia até grandes valores positivos.

$$RSR = \frac{RMSE}{DV_o} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{m,i})^2} \right]} \quad \text{Eq. 24}$$

em que RSR é o erro padrão médio normalizado, adimensional; i é sequência temporal de pares observados e simulados; n é número de pares observados e simulados; Q_o é a vazão observada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; Q_s é a vazão simulada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e Q_m é a vazão média observada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Para a avaliar o desempenho do modelo com base nessas estatísticas foi adotado os critérios propostos por Moriasi et al. (2007), critérios estes também utilizados por diversos autores (SILVA; CASTRO; ANDRADE et al.; ARAGÃO et al., 2013; FUKUNAGA et al., 2015). Os valores são apresentados na Tabela 4 para as estatísticas utilizadas com valores e as respectivas classificação do modelo.

Tabela 4: Classificação do modelo conforme valores dos coeficientes estatísticos

Desempenho	NS	Pbias (%)	RSR
Muito bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	$ P_{\text{bias}} < \pm 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	$\pm 10 < P_{\text{bias}} \leq \pm 15$	$0,50 < RSR \leq 0,60$
Satisfatório	$0,50 < NS \leq 0,65$	$\pm 15 < P_{\text{bias}} \leq \pm 25$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
Insatisfatório	$NS \leq 0,50$	$ P_{\text{bias}} \leq \pm 25$	$NS \leq 0,70$

4.4 Análise da produção de água na bacia hidrográfica do Catolé Grande

A análise espacial da produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande foi realizada por meio das médias anuais do escoamento superficial, evapotranspiração, escoamento lateral, armazenamento de água no solo e precipitação de cada sub-bacia a partir de dados mensais.

Os dados utilizados nos cálculos são encontrados no arquivo de saída do SWAT denominado output.sub. Para avaliar a dispersão dos dados em relação à média, foram calculados os desvios padrão para cada sub-bacia. A fim de verificar se a produção de água em cada sub-bacia apresentaram diferenças entre si realizou-se a análise de variância (ANOVA) ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F, seguida pelo teste t a nível de 5% de probabilidade no software SAEG.

A análise foi realizada nos períodos utilizados na calibração e validação, referentes à janeiro de 2003 à dezembro de 2005 e janeiro de 1997 à dezembro de 2000, respectivamente, totalizando 7 anos simulados, em escala de tempo mensal. Vale ressaltar que o período utilizado no aquecimento não fora utilizado devido as incertezas existentes no início das simulações.

A partir das médias de cada componente da produção de água foram elaborados mapas geográficos para auxiliar na interpretação dos resultados e realizada uma análise do componentes do balanço hídrico na produção de água das sete sub-bacias estudadas por meio da interface ArcGIS/Arcswat

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de sensibilidade

Na Figura 9 é apresentado o ordenamento dos parâmetros que exercem influência nos processos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Por meio desta análise verificou-se que dentre os 20 parâmetros avaliados, 15 apresentam de média a alta influência no resultado do modelo.

Dentre os 15 parâmetros sensíveis 3 correspondem ao processo de escoamento superficial (CN2, Surlag e Canmx), 4 de fluxo de base (Alpha_bf, Gwqmn, Revapmn e Gw_revap), 3 das características do solo (Sol_K, Sol_Z e Sol_AWC), 1 de fluxo no canal (CH_k2), 2 da evapotranspiração (ESCO e EPCO), 1 de cultura (Blai) e 1 da geomorfologia da bacia (Slope).

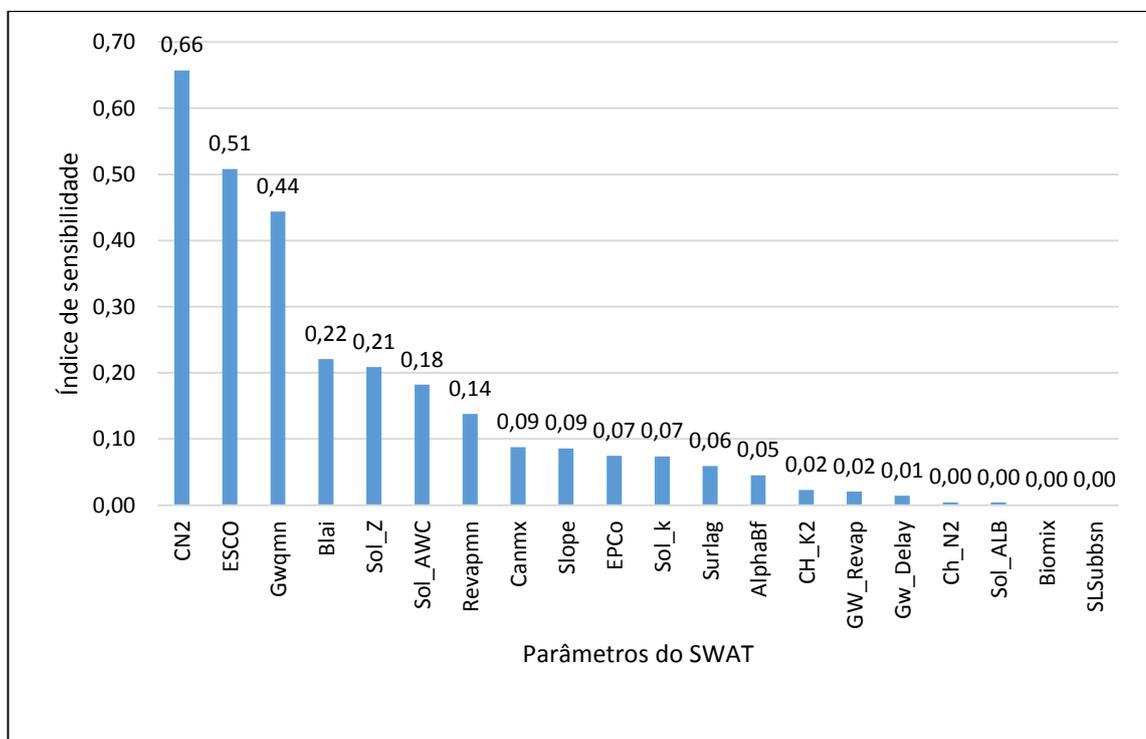


Figura 9: Análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT.

Considerando os valores obtidos na análise de sensibilidade e adotando a classificação proposta por Lenhart et al. (2002) (Tabela 2) os parâmetros Curva número para a condição de umidade antecedente II (CN2), fator de compensação da evaporação do solo (Esco), nível limite de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de base (Gwqmn), Índice de área foliar máximo (Blai) e Profundidade da camada do solo (Sol_z) possuem alta sensibilidade na modelagem da vazão.

O CN2 foi o parâmetro de maior influência na modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. O método do Número da Curva é utilizado para estimar lâmina de escoamento superficial a partir de informações de precipitação e condições da bacia, tais como uso do solo, condições de cultivo, condição hidrológica e tipo do solo (PRUSKI, 2009). Ainda é considerada para a estimativa da lâmina de escoamento pelo método do Número da Curva a condição antecedente de umidade.

A maior sensibilidade ao parâmetro CN2 está associada a variabilidade anual na cobertura do solo, em especial da pastagem. Ao longo dos meses do ano, o nível de cobertura da pastagem pode variar em decorrência das características climáticas da região, podendo apresentar boa cobertura em épocas com maiores índices pluviométricos e menor cobertura em períodos secos. Dessa forma, o escoamento superficial sofrerá variações em função da época do ano, onde períodos com melhor cobertura do solo apresentará menor lâmina escoada. Todos estes fatores tornam o modelo bastante sensível ao CN2.

Diversos são os estudos que corroboram com as informações apresentadas e apontam o CN2 como parâmetro de grande importância no processo de modelagem da vazão utilizando o SWAT. Jha (2009) realizando análise de sensibilidade na bacia hidrográfica do Rio Maquoketa no nordeste de Iowa, identificou extrema sensibilidade do modelo SWAT ao parâmetro CN2 para simulação de vazão. Esta sensibilidade ocorreu tanto na estimativa do escoamento superficial quanto do fluxo de base, uma vez que ao elevar o valor deste parâmetro houve incremento do deflúvio na superfície do solo, ocorrendo o inverso com a infiltração.

Andrade et al. (2013) em simulação realizada na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara no sul de Minas Gerais, obtiveram o CN2 como o parâmetro mais sensível ao modelo, apesar da predominância dos parâmetros relacionados com o fluxo de base. Lelis et al. (2012), na simulação realizada no ribeirão São Bartolomeu no estado de Minas Gerais, realizaram análise de sensibilidade em 4 sub-bacias identificando em duas delas o parâmetro CN2 como o mais sensível. Foi evidenciado que a sensibilidade dos parâmetros são influenciados pelo uso e

ocupação do solo e topografia, características que são diretamente utilizadas na escolha da curva número.

Outros trabalhos também apontam a sensibilidade do SWAT ao CN2, tais como Aragão et al. (2013), Lopes (2008), Castro (2013), Lino et al. (2009), entre outros.

O parâmetro Esco é responsável por ajustar a demanda evaporativa do solo, uma vez que o SWAT permite contribuição apenas da camada superior neste processo (NEITSCH et al., 2005). Esse ajuste é necessário para que o modelo considere o efeito de capilaridade e selamento superficial para compensar a demanda das plantas no processo de evapotranspiração.

Em regiões semiáridas existe uma variação na evapotranspiração durante os meses do ano, uma vez que em ambientes com essas características climáticas a limitação de umidade de água no solo é o fator mais importante que afeta a evapotranspiração (LI et al., 2007). Associado a isso, tem-se a variação no crescimento da cobertura vegetal decorrente da variabilidade climática que também interfere na taxa de evapotranspiração potencial. Essas variações ao longo dos meses do ano, afetam o Esco e faz deste um parâmetro importante para a aplicação do SWAT na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

Com índice de sensibilidade de 0,44 o Gwqmn é o terceiro parâmetro com maior influência na variável de saída do modelo. Ele representa o nível de água no aquífero para que ocorra a contribuição do fluxo de base na vazão do canal principal e apesar de ser importante na Bacia hidrográfica do rio Catolé Grande, nos trabalhos realizados por Paim e Menezes (2009), Betrie et al. (2011), Ferrigo et al. (2011) e Aragão et al. (2013) este parâmetro esteve no grupo de média importante.

O modelo também apresentou alta sensibilidade aos parâmetros Blai e Sol_z. O primeiro interfere na quantidade de precipitação que chega a superfície do solo e na evapotranspiração. O Blai representa o índice de área foliar das plantas, sendo que quanto maior seu valor, maior lâmina precipitada que ficará retida no dossel. Tal característica faz com que o Blai afete o escoamento superficial, pois terá interferência nas abstrações iniciais consideradas no método do Número da Curva. Por sua vez o Sol_z é a profundidade do perfil do solo e afeta a quantidade de água armazenada e o tempo de infiltração, sendo importante para o abastecimento do lençol freático.

Dos parâmetros que apresentaram média sensibilidade destaque para o Surlag, coeficiente de atraso do escoamento superficial, que nos trabalhos realizados por Sarmiento (2010), Santos et al. (2013) e Castro (2013) obteve-se alta sensibilidade. Este parâmetro é responsável pela liberação do escoamento superficial para o canal principal em bacias com tempo de

concentração elevado atuando no retardamento do escoamento superficial (NEITSCH et al., 2005). O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é o tempo necessário para que a água precipitada na região mais extrema da bacia se desloque para a seção analisada e sofre influência das características físicas da bacia. Tais características abrangem forma, declividade, relevo, densidade de drenagem e características geológicas.

A sensibilidade do SWAT ao Surlag está diretamente relacionada com o tempo de concentração da bacia em estudo. Esta informação foi ratificada no estudo realizado por Cibin et al (2010) em duas bacias distintas, onde a sensibilidade atribuída ao Surlag maior naquela onde o tempo de concentração é mais elevado.

Os demais parâmetros aos quais o modelo apresentou sensibilidade, na ordem do maior para menor, foram: coeficiente de recessão do fluxo de base (Alpha_bf); capacidade de armazenamento de água no solo (Sol_awc); condutividade hidráulica efetiva do canal (CH_k2); profundidade limite da água no aquífero para que ocorra ascensão da água à zona não saturada do solo (Revapmn); fator de compensação de consumo de água pelas plantas (Epc0); Coeficiente de manning do canal (CH_N2); declividade da sub-bacia (Slope); Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (Canmx); Tempo de atraso para recarga do aquífero (Gw_delay) e a condutividade hidráulica do solo (Sol_K).

5.2 Calibração, validação e avaliação do modelo

Após realização da análise de sensibilidade para identificar a sensibilidade dos parâmetros utilizados na simulação da vazão, optou-se por calibrar os 20 parâmetros, haja vista que o modelo apresentou média ou alta sensibilidade a 80% dos parâmetros. Esta opção foi possível devido a eficiência da calibração automática, situação que poderia ser dificultada caso fosse utilizado o método manual, que tornaria o processo demorado.

Durante o processo de calibração atentou-se para que os parâmetros fossem ajustados dentro da faixa de variação que tenha significado físico, uma vez que o modelo SWAT utiliza estes parâmetros em equações referentes à hidrologia do local de estudo (PEREIRA, 2013). Os valores para os parâmetros calibrados estão apresentados na Tabela 5.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos coeficientes estatísticos encontrados para os períodos de calibração e validação, utilizados para avaliar o desempenho do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande com dados de saída em escala de tempo mensal.

Tabela 5: Valores dos parâmetros obtidos na calibração automática

Parâmetro	Valor ajustado
Substituição direta	
Alpha_bf	0,0095
Biomix	0,569
Blai	0,480
Canmx	0,536
Ch_k2	354,11
Ch_N2	0,249
Epc0	0,734
Surlag	9,4497
Esco	0,267
Porcentagem multiplicada ao valor padrão	
CN2	-24,21%
Sol_alb	-12,08%
Sol_awc	16,73%
Sol_k	-13,31%
Slope	-22,98%
Ssubbsn	-7,32%
Sol_z	-13,19%
Adição ao valor padrão	
Revapmn	-80,30
Gw_delay	2,3453
Gw_Revap	0,028859
Gwqmn	924,57

A partir dos valores 0,54 e 0,53 para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) nas etapas de calibração e validação (Tabela 6), respectivamente, pode-se classificar o modelo como satisfatório, conforme a classificação de Moriase et al. (2007) (Tabela 4). Este coeficiente estatístico é bastante utilizado, facilitando a comparação dos resultados da pesquisa com outros anteriormente realizados. Por meio dos resultados obtidos para o NSE, concluiu-se que o modelo simula de forma satisfatória a vazão na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) é bastante influenciado por valores extremos, tantos secos como picos. A normalização da variância entre os dados observados e simulados através da diferença entre o observado e a média dos observados tende a ser maior em bacias com dinâmicas mais elevadas, acarretando valores de NSE menores que os obtidos em bacias com menores dinâmicas (KRAUSE et al., 2005).

Tabela 6: Resultado das estatísticas para os períodos de calibração e validação

Etapa	Estatística de precisão		
	NSE	Pbias	RSR
Calibração	0,54	5,13%	0,68
Validação	0,53	6,24%	0,69

Muitos trabalhos utilizaram o SWAT para simulações mensais da vazão, obtendo bons valores de NSE. Andrade et al. (2013) calibrou e validou o SWAT para a bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara, sul do estado de Minas Gerais, encontrando índices de 0,66 e 0,87 respectivamente, para o período de janeiro de 2006 à agosto de 2009. Durães et al. (2012) obteve um coeficiente de NSE superior a 0,75 em simulação realizada na bacia hidrográfica do rio Paraopeba-MG, considerando o resultado como bom e aceitável (Tabela 4).

Feyresen et al. (2007) testou o modelo SWAT na bacia hidrográfica do Rio Pequeno próximo à costa da Georgia obtendo NSE de 0,59 para calibração em um período de sete anos com baixos índices pluviométricos, indicando que o modelo SWAT é menos adequado para períodos secos e que as chuvas sazonais implicaram negativamente no valor do coeficiente.

Lelis et al. (2009) analisando a dinâmica hidrológica do Rio Preto e utilizando a técnica de calibração automática conseguiu NSE de 0,51, sendo considerado como satisfatório. Perazzoli et al. (2013) obteve NSE de 0,82 para simulações mensais na bacia do Ribeirão Concórdia, atribuindo uma ajuste satisfatório ao modelo.

Por meio da verificação de trabalhos disponíveis, os resultados obtidos na calibração do SWAT para a bacia hidrográfica do rio Catolé Grande estão dentro da faixa aceitável para que o modelo possa ser utilizado na análise hidrológica desta região, segundo o coeficiente NSE.

O Pbias apresentou resultados de 5,13% e 6,24% para etapa de calibração e validação, respectivamente (Tabela 6). Apesar dos resultados de Pbias mostrarem que o modelo subestimou a vazão média na calibração e validação, o desempenho pode ser classificado como muito bom para ambas as etapas (LIEW et al.; MORIASI et al., 2007), o que infere-se que, em média, os valores estimados podem ser utilizados para análise da vazão na seção de controle da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

Rocha et al. (2015) avaliando o impacto da aplicação de práticas agrícolas sustentáveis na bacia de Vouga, Portugal, encontrou um Pbias médio de 17,1% para as cinco estações utilizadas na calibração da vazão, considerando o resultado como satisfatório. Machado (2002) após a calibração do SWAT obteve um Pbias de -0,7%, indicando uma pequena superestimação da vazão no Ribeirão dos Marins. Li et al. (2009) avaliaram os impactos da mudança do uso do

solo e variabilidade climática na hidrologia superficial em uma bacia do planalto de Loess na China, obtendo para o Percentual de viés 4,0% e 2,5%, na calibração e validação, respectivamente.

Os valores 0,68 e 0,69 obtidos da estatística RSR durante a etapa de calibração e validação do modelo, respectivamente. Portanto, o modelo pode ser classificado como “satisfatório” para as duas etapas, conforme Moriasi et al. (2007).

Salles (2012) utilizando o RSR para avaliar a acurácia do SWAT encontrou 0,58 e 0,46 para calibração e validação respectivamente, concluindo através desta estatística que o modelo estimou a vazão mais precisamente na etapa de validação. Li et al. (2009) obteve para RSR na calibração 0,36 para calibração e validação.

Os resultados baixos para NSE e RSR podem ser explicado pelo clima semiárido da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Este tipo climático é caracterizado pela variabilidade temporal das chuvas (CIRILO, 2008). Atkinson et al. (2002) afirmaram que a simulação da vazão em regiões semiáridas tende a ser mais sensíveis que áreas úmidas, reduzindo a capacidade do modelo em representar tal variação.

Os valores das vazões médias simuladas e observadas para os períodos de calibração e validação estão apresentados na Tabela 7. Em média, o modelo subestimou a vazão tanto para o período de calibração quanto validação em torno de 5% e 6%, respectivamente. Estes valores apontam que o ajuste do modelo permite o estudo da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

Tabela 7: Vazões médias simuladas e observadas

Período	Vazão média observada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Vazão média simulada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Calibração	12,78	12,13
Validação	12,36	11,59

Outra ferramenta utilizada para avaliar o desempenho do modelo neste trabalho é o hidrograma. A ferramenta de análise gráfica do modelo é bastante eficiente pois fornece ao modelador uma avaliação dos dados simulados frente aos observados (PEREIRA, 2013).

Na Figura 10 estão representados os dados de vazão observados, simulados e a lâmina mensal precipitada para o período de calibração do modelo na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Na Figura 11 são apresentados os mesmos dados, porém para o período de validação.

Por meio da análise do hidrograma e hietograma (Figura 10 e Figura 11), observa-se que de forma geral o modelo tende a superestimar a vazão em períodos com chuvas de baixa intensidade e a subestimar quando ocorre picos de precipitação.

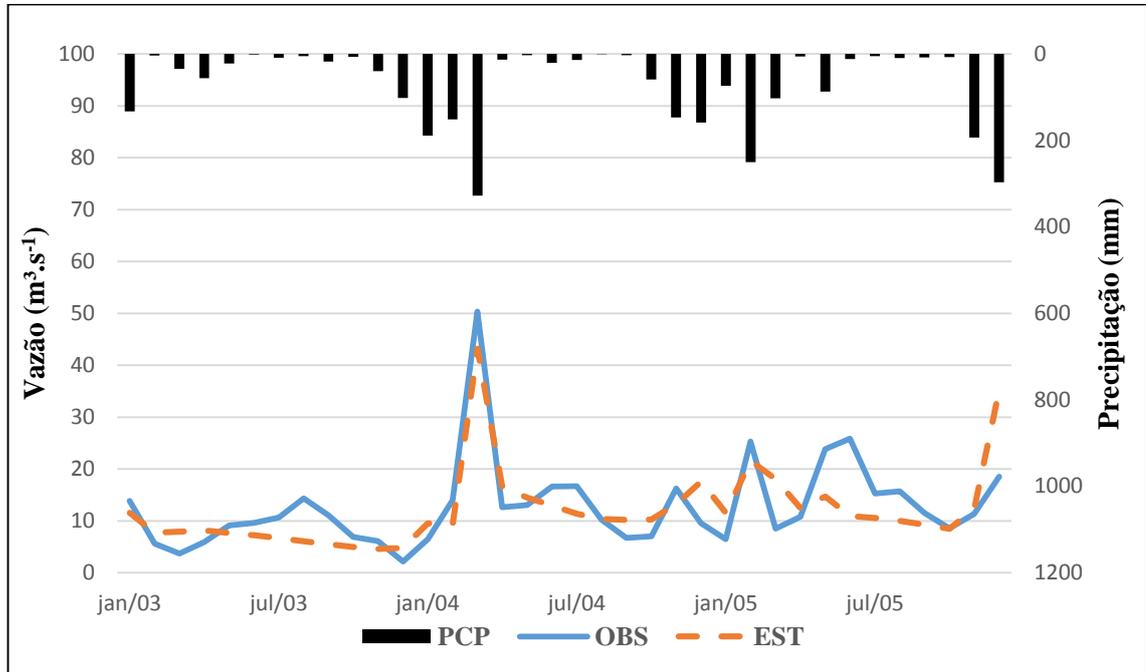


Figura 10: Hidrograma das vazões simuladas e observadas e hietograma para período de calibração.

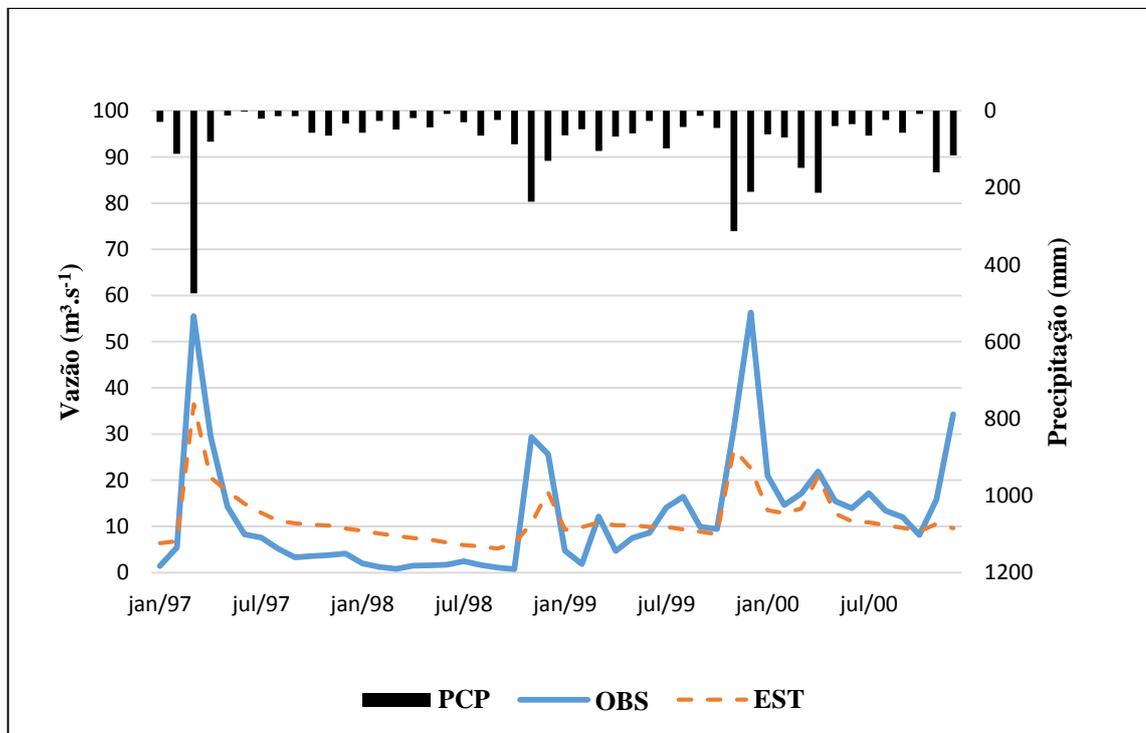


Figura 11: Hidrograma das vazões simuladas e observadas e hietograma para período de validação.

Na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande o ano hidrológico tem início em Julho e término em junho do ano seguinte, sendo janeiro o mês mais chuvoso e julho o mais seco. O ano hidrológico 97/98 foi atípico, caracterizado por baixas lamina precipitada em todos os meses. Neste período do modelo superestimou a vazão observada durante todo o ano como pode ser observado na Figura 11.

O maior pico de vazão observado durante os períodos de calibração e validação foi registrado no mês de dezembro de 1999 com magnitude de $56,36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ enquanto o simulado subestimou este evento em 60% (Figura 11). Por sua vez, a mínima vazão observada foi $0,79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a simulada $7,93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para o mês de Março de 1998

Foi observada redução do parâmetro CN2 em aproximadamente 24% durante o processo de calibração automática (Tabela 5) o que acarretou menor quantidade de escoamento superficial e aumento da lâmina infiltrada. Uma vez que o escoamento superficial é o principal responsável pelos picos de vazão, a redução deste terá efeito de atenuação desses eventos e uma maior contribuição durante o período de recessão, o que ajuda a explicar a tendência geral do modelo subestimar os picos.

Outro parâmetro ajustado durante a calibração automática que explica tal comportamento da hidrógrafa estimada é o Sol_awc. Este parâmetro é responsável pelo armazenamento da água no solo como definido na Equação 11. Na calibração automática o valor deste parâmetro foi aumentado em mais de 16%. Desta forma o solo tem maior capacidade de armazenamento de água, levando mais tempo para saturar diminuindo o escoamento superficial.

Avaliando o modelo pela hidrográfa e por meio de índices estatísticos observou-se que o modelo apresentou melhor desempenho na fase de calibração, o que também foi observado por Fukunaga et al. (2015), Aragão et al. (2013) e Lélis et al. (2012). Isto explica-se pelo fato dos parâmetros serem ajustados para o período de calibração no qual há tentativa de aproximar ao máximo os dados simulados dos observados, o que não ocorre na validação, sendo o modelo executado em período diferentes, e em se tratando de regiões semiárida, essa diferença pode ser maior.

Os resultados mostram que a modelagem com o SWAT pode ser uma ferramenta útil na simulação da vazão na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Em vários locais do mundo o estudo da quantidade da água é um dos mais importantes e realizados, principalmente em função das vazões médias. Segundo Fukunaga et al. (2015), o volume de água é descrito como a quantidade de água que é utilizada na agricultura, consumo humano e demais atividades. Visto que a simulação da vazão média com o modelo SWAT apresentou resultados satisfatórios, os

dados encontrados neste trabalho poderiam ser utilizados para esta finalidade sem cometer grandes equívocos.

5.3 Produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande

Após realizar a calibração e validação do modelo e com obtenção de resultados satisfatórios para NSE e RSR e muito bom para Pbias, foi realizado estudo da produção de água para cada uma das sete sub-bacias do rio Catolé Grande, gerada pelo ArcSwat. A análise de variância (Tabela 8) mostrou que existe diferença estatística entre os tratamentos (sub - bacias) ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

Tabela 8: Análise de variância para a produção de água nas Sub-bacias

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	6	279426,21	46571.03	9.03**
Resíduo	42	216551,25	5155.98	
Total	48	495977.45		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$).

Na Figura 12 é apresentada a produção de água para cada sub-bacia na área de estudo. As sub-bacias 3, 4, 6 e 7 apresentaram média mensal de produção de água de 234, 216, 217 e 180 mm, respectivamente, porém as mesmas não diferem entre si a nível de 5% de probabilidade pelo de t (Tabela 9). Vale ressaltar que a sub-bacia 3 produziu 30% a mais de água que a bacia 7, porém o coeficiente de variação do conjunto de dados analisados foi de 46,79%, evidenciando grande variabilidade no conjunto de dados hídrico mensal realizado no período de 7 anos. Estas quatro sub-bacias foram as responsáveis por 79,03% da produção de água da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

Outro grupo de bacias identificado neste trabalho é formado pelas sub-bacias 5 e 7, que não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de t, com médias de produção de água de 136 e 180 mm, respectivamente. Portanto, tais bacias, em média, tem o mesmo potencial de produção de água, considerando o período analisado.

Este grupo é caracterizado por uma produção de água mediana dentro da bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Ambas sub-bacias são influenciadas pelas condições meteorológicas da estação de Itapetinga, mas apesar de apresentarem proporções semelhantes de precipitação à sub-bacias 4 e 6, apresentaram maiores níveis de evapotranspiração real fazendo com que a produção de água fosse menor.

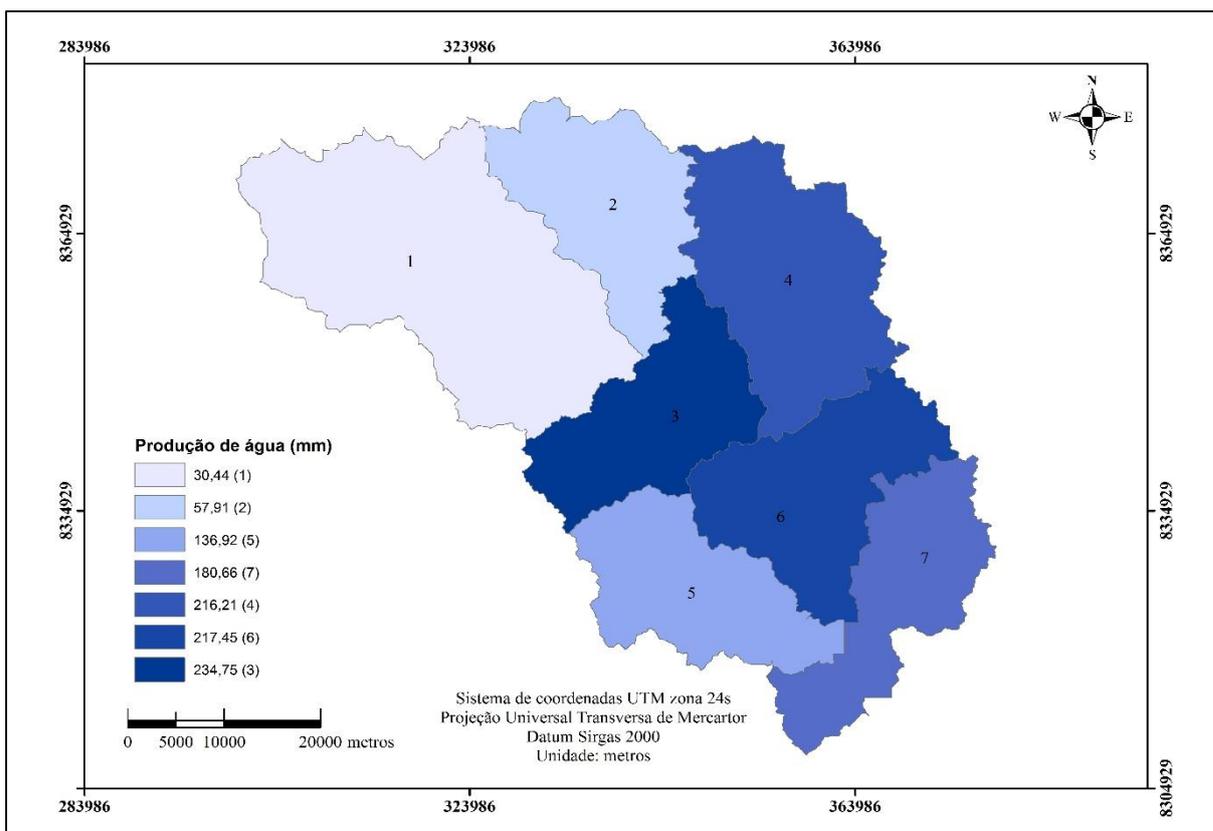


Figura 12: Produção de água para cada sub-bacia.

As sub-bacias 1 e 2 possuem produção de água média anual de 30 e 57 mm (Figura 12), respectivamente, e não diferem entre si a nível de 5% de probabilidade, embora diferem das demais (Tabela 9). Essas duas sub-bacias contribuem com menor parcela na produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Uma característica associada à baixa produção de água é o fato destas sub-bacias utilizarem dados da estação meteorológica de Vitória da Conquista que apresenta médias anuais precipitadas inferiores em relação à de Itapetinga, como citado na seção 4.2.4.

Tabela 9: Resultado do teste t a 5% de probabilidade para produção de água anual

Sub-bacias	Médias dos tratamentos (mm) ⁽¹⁾
1	30,44 c
2	57,91 c
3	234,75 a
4	216,21 a
5	136,92 b
6	217,45 a
7	180,66 ab
DMS = 153,48 CV = 46,79%	

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, na vertical, não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade; DMS = diferença mínima significativa; CV = coeficiente de variação.

Segundo a CAR (1995) e Jesus (2010), o município de Vitória da conquista está inserida em região semiárida com algumas área com clima subsúmido. Nestas condições, é esperada grande variabilidade nos totais precipitados anuais, bem como das demais variáveis climáticas (MARENGO, 2008), tornando os componentes do balanço hídrico anual extremamente variável.

Além de possuir uma precipitação média anual inferior às sub-bacias que produzem mais água, o armazenamento de água no solo nas sub-bacias 1 e 2 foi maior que nas demais (Figura 13).

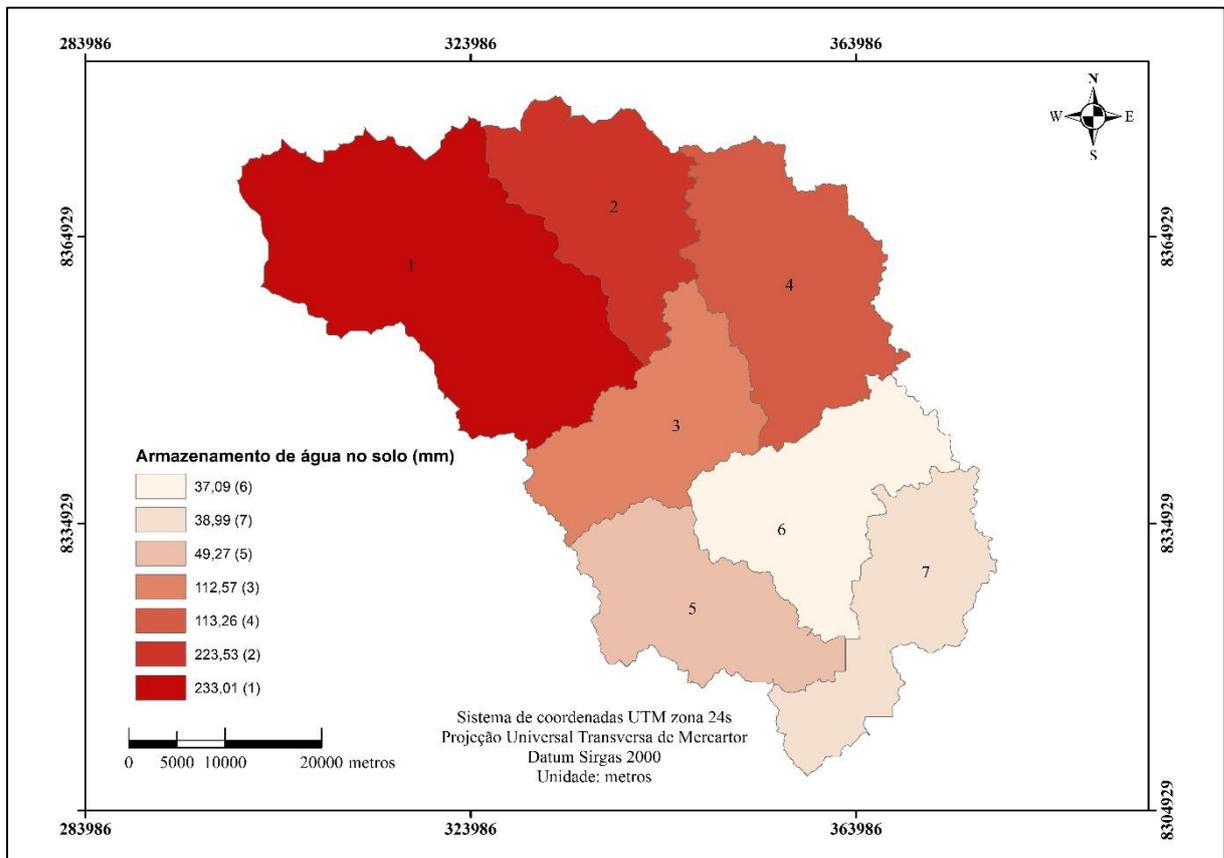


Figura 13: Armazenamento de água no solo para sub-bacias.

A quantidade de água armazenada no solo obtida para as sub-bacias está relacionado ao tipo de solo que as constitui. Conforme apresentado na Tabela 10, dois tipos de solo são predominantes na bacia, latossolo e chernossolo. Regiões constituídas de latossolo têm maior nível de armazenamento de água no solo se comparado com regiões onde predomina chernossolo.

Tabela 10: Valores percentais de classes de solo, declividade e uso do solo para cada uma das sete sub-bacias estudadas

Sub-bacia	Classes de solo				Declividades					Uso e ocupação do solo*		
	Latossolo	Chernossolo	Argissolo	Nitossolo	0-5	5-10	10-20	20-40	40---	Pastagem degradada	Pastagem fraca	Floresta
1	99,96	-	-	-	85,39	14,57				62,45	37,5	-
2	96,17	3,93	-	-	59,64	20,13	13,57	5,97	0,72	45,37	37,95	16,7
3	60,51	39,53	-	-	11,79	6,55	17,35	39,39	24,97	38,63	50,77	10,64
4	46,66	53,37		-	20	11,35	20,12	35,72	12,85	39,16	49,75	11,11
5	2,09	94,02	3,92	-	48,06	15,05	15,07	19,74	2,10	34,51	54,73	10,78
6	-	100	-	-	28,69	11,62	16,32	29,26	14,15	64,61	23,57	11,86
7	-	96,18	-	3,74	41,72	12,38	13,25	21,6	10,96	67,47	18,43	14,02

* Estão apresentadas apenas as classes de uso e ocupação do solo que permanecerão após a criação das HRU.

Tal afirmativa pode ser utilizada para explicar o maior armazenamento nas sub-bacias 1 e 2 (constituição próxima a 100% de latossolo), mediano das sub-bacias 3 e 4 (constituídas por cerca 60% e 47% de latossolo, respectivamente) e baixo armazenamento nas sub-bacias 5, 6 e 7 (constituição de 100% de chernossolo), como pode ser visto na (Tabela 10) A separação das sub-bacias em três grupos de acordo com o armazenamento de água corrobora com o resultado do teste t realizado a nível de 5% de probabilidade (Tabela 11).

Tabela 11:Resultado do test t a 5% de probabilidade para armazenamento de água no solo

Sub-bacias	Médias dos tratamentos (mm) ⁽¹⁾
1	229,34 a
2	223,53 a
3	112,57 b
4	113,26 b
5	49,27 c
6	37,09 c
7	38,98 c
DMS =28,13	CV= 22,72%

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, na vertical, não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade; DMS = diferença mínima significativa; CV = coeficiente de variação.

Os latossolos são solos caracterizados pela elevada profundidade e, em geral, apresentam alta permeabilidade devido a condutividade hidráulica elevada (KER, 2013). Essas características atribui ao latossolo melhores índices de armazenamento de água se comparado aos chernossolo que, conforme Sartori et al. (2005), são solos pouco profundos e em geral com baixa taxa de infiltração.

Da produção de água média total na bacia do rio Catolé Grande, as sub-bacia 3 e 4 apresentam menor contribuição via escoamento superficial (Figura 14). Isso pode ser justificado pela presença predominante de latossolo nas áreas destas sub – bacias (Tabela 10) solo este que possui maior capacidade de infiltração de água.

Outro aspecto que contribui para os baixos níveis de escoamento superficial nas sub-bacias 3 e 4 é a menor presença de pastagens degradadas (aproximadamente 39% da cobertura do solo) em comparação com as sub-bacias 6 e 7 (64% e 67% da cobertura do solo, respectivamente) (Tabela 10), fazendo com que a contribuição destas sub-bacias através do escoamento superficial seja maior.

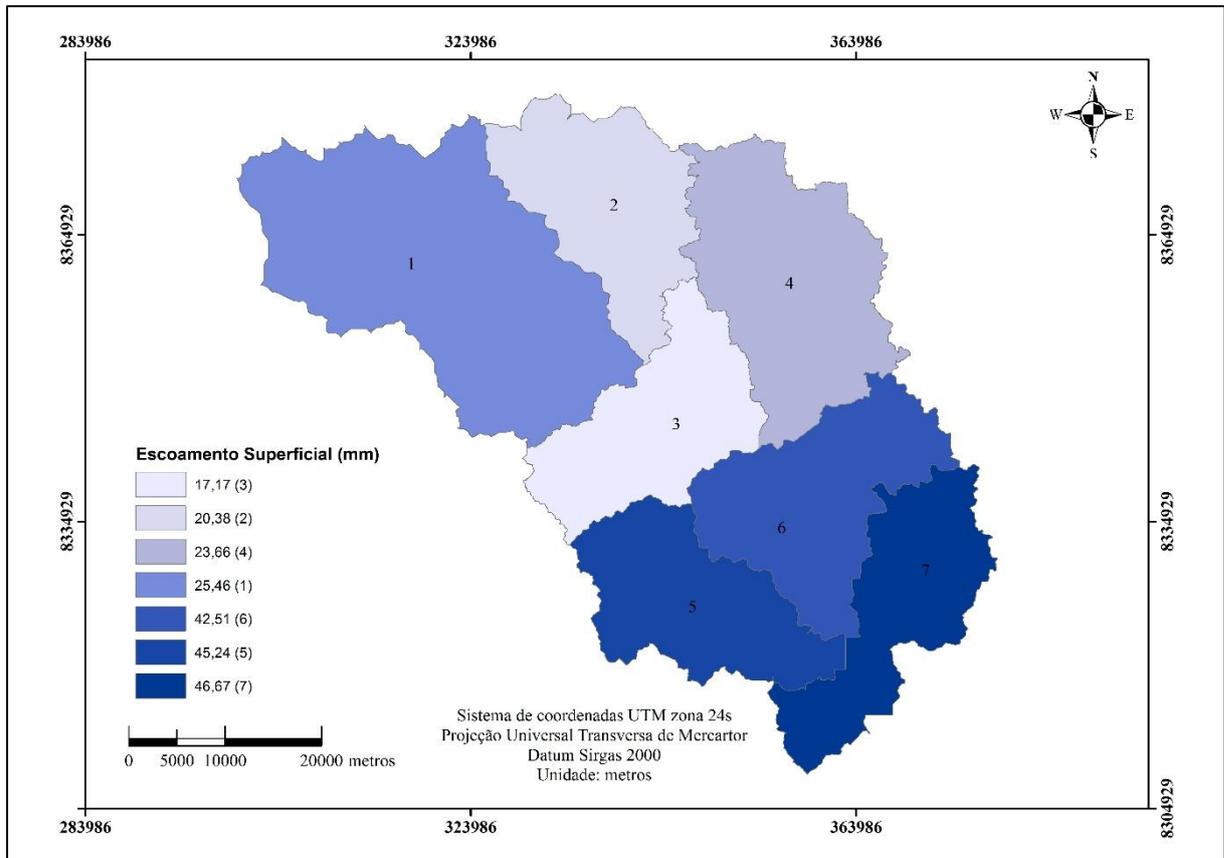


Figura 14: Escoamento superficial para cada sub-bacia.

Como neste trabalho foi utilizado o método da Curva Número para estimar a lâmina escoada superficialmente, a presença de pastagem degradada aumenta os valores de CN (Equação 7) acarretando na redução das abstrações iniciais e aumento no deflúvio superficial nas sub-bacias com maior presença de pastagem degradada.

As sub-bacias 5 e 7 foram as principais responsáveis pela contribuição do escoamento superficial para a produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. Esse aspecto está relacionado à presença de chernossolo em mais de 90% da área destas sub-bacias. Isso faz com que a quantidade de água armazenada no solo seja baixa comparada com sub-bacias de montante formadas por latossolo, além do fato desse tipo de solo tender a apresentar menor capacidade de infiltração e, conseqüentemente, maior escoamento superficial.

Segundo Silva et al. (2007), os chernossolos apresentam horizonte superficial chernozêmico (rico em matéria orgânica e bases) sobre horizonte B textural ou incipiente e com argila de atividade alta e alta saturação por bases, podendo afetar o processo de infiltração.

As baixas proporções do escoamento lateral (Figura 15) nas sub-bacias 1 e 2 podem ser atribuído ao relevo mais plano, onde mais de 85% da sub-bacia 1 e 60% da sub-bacia 2 estão

compreendidas em regiões com declividades iguais ou inferiores a 5% como pode ser visto na (Tabela 10). Zaslavsky e Sinai (1981) em pesquisa realizada descobriram que a topografia é o fator dominante nos mecanismos de escoamento lateral. Este fato é ratificado pela Equação 10 utilizada pelo SWAT para estimar o escoamento lateral, onde a variável “slp”, definida como a declividade da sub-bacia, é diretamente proporcional à produção de água.

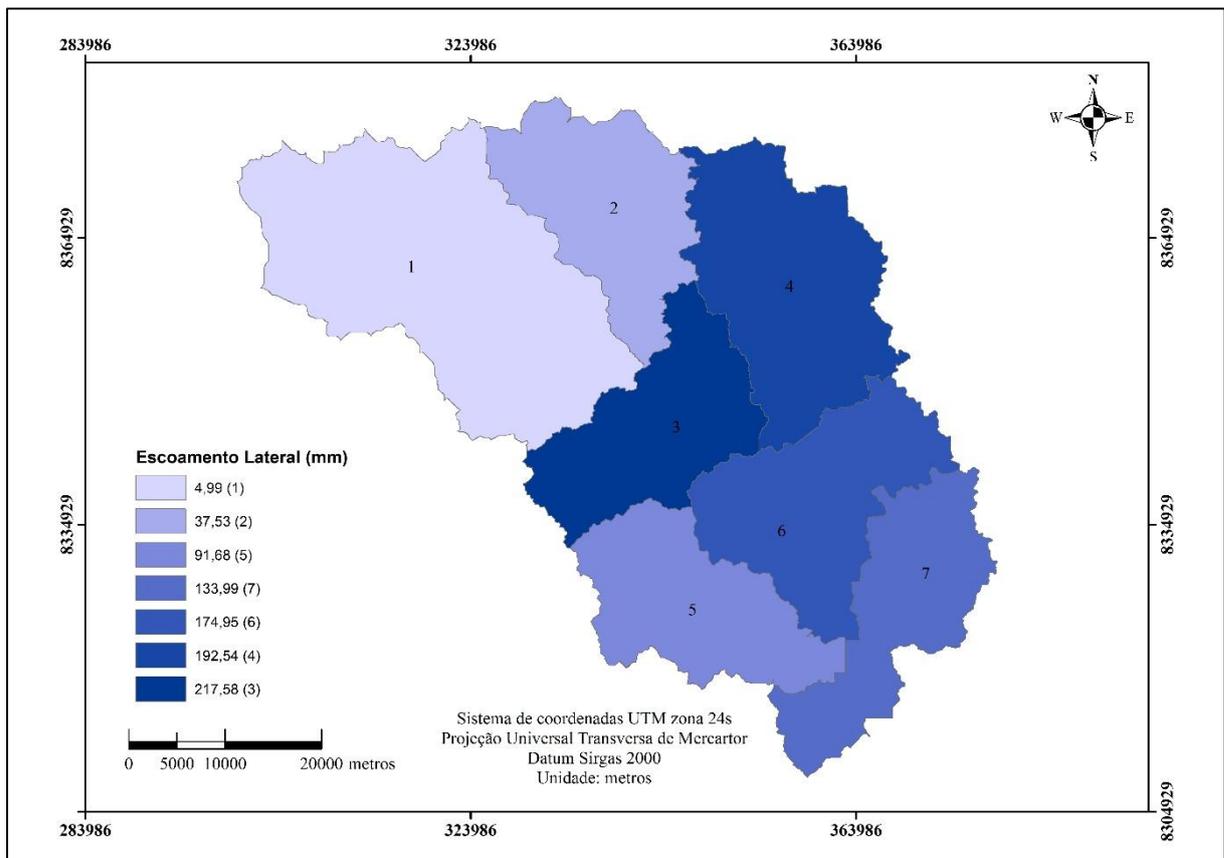


Figura 15: Escoamento lateral para cada sub-bacia.

Embora a evapotranspiração na sub-bacia 5 tenha sido ligeiramente superior às demais (Figura 16), observou-se pelo teste de t, ao nível de 5% de probabilidade, que não existe diferença significativa entre as 7 sub-bacias no que se refere à evapotranspiração real (ET_r). Vale ressaltar que em toda a bacia do rio Catolé Grande predomina pastagem, isto contribuiu para a obtenção de um CV de 19,14%, fato que evidencia uma baixa variabilidade nos valores de ET_r entre as diferentes sub-bacias analisadas.

De modo geral, na bacia hidrográfica do rio catolé grande a maior parcela da produção de água é proveniente do escoamento lateral das sub-bacias. Dentre as variáveis que interferem na produção de água, a declividade das sub-bacias foi fator preponderante, sendo as maiores

produções de água encontradas nas regiões mais declivosas. As sub-bacias 3, 4 e 6, que apresentaram maior escoamento lateral não diferindo estatisticamente entre si a nível de 5% pelo teste de t, são justamente aquelas localizadas na região com relevo mais acidentado da bacia (Tabela 10).

Com base no estudo da produção de água nas sub-bacias, evidencia-se a importância da conservação das bacias 1 e 2, que além de estarem localizados sob influência do clima semiárido e apresentarem maior armazenamento de água no solo, estão localizados dois reservatórios nestas sub-bacias. Os reservatórios Água Fria I e II são importantes para o abastecimento do município de Vitória da Conquista, terceira maior cidade do estado da Bahia e que já sofre com o déficit hídrico para fornecimento de água à população.

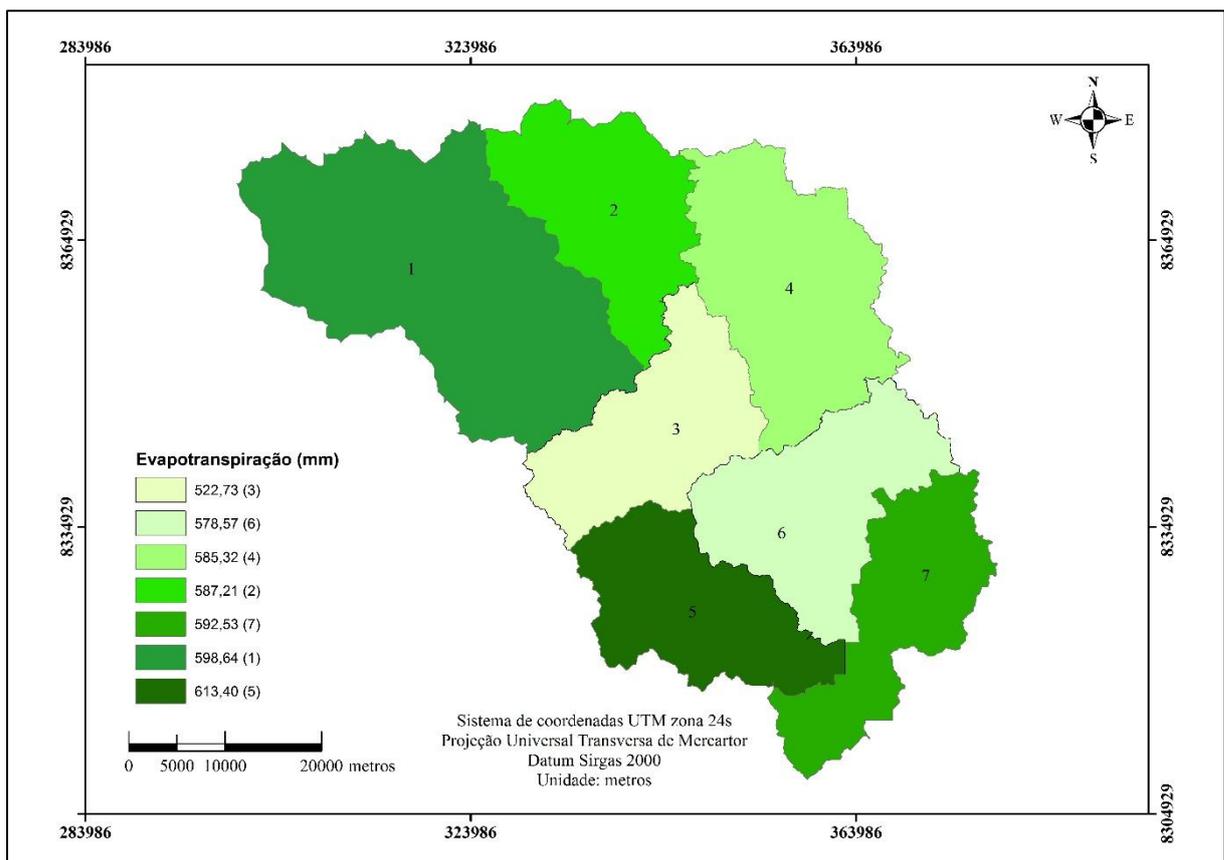


Figura 16: Evapotranspiração para cada sub-bacia

6.0 CONCLUSÃO

O modelo SWAT apresenta maior sensibilidade aos parâmetros CN2, Esco e Gwqmn para a simulação da vazão na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande. A sensibilidade do modelo a estes parâmetros é diretamente influenciada pela variação da precipitação durante os meses do ano, alternando períodos chuvosos com secos.

Com base no resultados obtidos para os coeficientes estatísticos NSE, RSR e Pbias obtidos nas etapas de calibração e validação, o ajuste do modelo pode ser classificado como satisfatório. Desta forma, o SWAT pode ser aplicado na simulação da vazão e análise da produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande.

No período analisado, as sub-bacias 3, 4, 6 e 7 são as principais responsáveis pela produção de água na bacia do Catolé Grande. As propriedades do solo, declividade da bacia e cobertura do solo são as variáveis que mais afetam a produção de água.

O escoamento lateral e o armazenamento de água no solo são os componentes que mais afetaram a produção de água na bacia do rio Catolé Grande. As sub-bacias que mais produziram água são as que apresentaram maior contribuição via escoamento lateral e armazenaram menor quantidade de água no solo.

7.0 RECOMENDAÇÕES

Com base na experiência obtida durante a realização deste trabalho, apresenta-se nesta seção algumas sugestões de pesquisas futuras que poderão ser realizadas a partir dos resultados logrados até aqui, bem como recomendações que poderão apresentar resultados mais abrangentes:

Dentre possíveis futuros trabalhos na bacia do rio Catolé Grande a partir dos resultados obtidos destacam-se as seguintes sugestões:

- Estudo da produção de sedimentos;
- Análise da qualidade de água;
- Impactos da introdução de reservatórios dentro da bacia;
- Cenários de uso e ocupação do solo: Uso do solo respeitando as Áreas de Preservação Permanentes (APP), Restauração de toda a mata ciliar na bacia; Substituição de 10% da pastagem por agricultura;
- Cenários climáticos: simulações do comportamento hidrológico da bacia sob diferentes alterações climáticas;

Para obtenção de resultados mais abrangentes poderão seguir as seguintes sugestões:

- Criação dos parâmetros do Gerador Climático de Série Sintética do próprio SWAT, para expansão da série histórica de dados climáticos;
- Utilização de malha climática criada a partir da interpolação de dados de pluviômetros locais e disponibilizada recentemente, com o objetivo de obter melhor espacialização das variáveis climáticas e expandir a série histórica;
- Melhoria dos mapas de uso e ocupação do solo por meio de imagens de satélite com melhor resolução espacial.

8.0 REFERÊNCIAS

- ADEOGUN, A.G.; SULE, B.F.; SALAMI, A.W. Simulation of Sediment Yield at the Upstream Watershed at Jebba Lake in Nigeria Using SWAT Model. **Malaysian Journal of Civil Engineering (MJCE)**, v. 27, n. 1, p. 25-40, 2015.
- ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56)
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S.. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p.69-76, out. 2013.
- ARAGÃO, R. de et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo swat e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestinor. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 37:1091-1102, 2013.
- ARNOLD, J. G.; FOHRER, N.. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Hydrol. Process.**, v. 19, n. 3, p.563-572, 2005.
- Arnold, J.G., et al. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**. Vol. 55, n. 4: 1491-1508, 2012.
- BALDISSERA, C. G. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005, 123 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.
- BENAMAN, J; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A.. Calibration and Validation of Soil and Water Assessment Tool on an Agricultural Watershed in Upstate New York. **Journal Of Hydrologic Engineering**, v. 10, n. 5, p.363-374, set. 2005.
- BETRIE, G. D. et al. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 15, n. 3, p.807-818, 2011.
- BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo:Prentice Hall, 2002.
- BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília, DF: Diário Oficial da Republica, 1997.

BRESSIANI, Danielle de Almeida et al. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p.1-27, jun. 2015

BRITTO, F.B. et al. Sustentabilidade Hídrica da Sub-Bacia do Rio Sangradouro, Sergipe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, n. 01, p. 155-164, 2014.

CAR – Companhia de Desenvolvimento e Ação Regional. A agropecuária no semiárido da Bahia. Salvador, 1995. 139p. (Série Cadernos CAR, 19).

CARVALHO NETO, J. G. de. **Simulação hidrossedimentalógica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. 2011. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, UFCG, Campina Grande, 2011.

CASTRO, K. B. de. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. 2013, 118 f. Dissertação (Mestrado em Geociência) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrol. Process.**, v. 24, n. 9, p.1133-1148, 30 abr. 2010.

COFFEY, R. et al. Development of a pathogen transport model for Irish catchments using SWAT. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 1, p.101-111, janeiro, 2010.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K.. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal Of Hydrology**, v. 158, n. 34, p.265-284, jun. 1994.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. DE; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba river basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 481-488, out./dez. 2011

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FAYAL, M. A. A. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada wavelet**. 2008, 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FERRIGO, S.. **Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal**. 2011. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, UFSC, Florianópolis, 2011.

FEYEREISEN, G. W.; STRICKLAND, T. C.; BOSCH, D. D.. Evaluation of SWAT Manual Calibration and Input Parameter Sensitivity in the Little River Watershed. **Transactions Of The Asabe**, v. 50, n. 3, p.843-855, 2007.

FUKUNAGA, D. C. et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p.206-213, fev. 2015.

- GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A.. **Hidrologia**. São Paulo: Edgard Blücher. 1988, 291 p
- GASSMAN, P.W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications and future research directions. **American Society of Agricultural Biological Engineers**, V. 50, n. 4, p. 1211–250, Maio, 2007
- GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S., BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação do solo: Conceitos, temas e aplicação**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009, 340p.
- 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, abr. 1999.
- JESUS, R. B. de. Os recursos naturais e sua exploração na formação territorial do município de Vitória da Conquista-ba. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer,- Goiânia, vol.6, n.9, 2010.
- JHA, M. **Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT**. Center for Agricultural and Rural Development (CARD). Ames, Iowa State University, 2009.
- KER, J.C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, 5:17-40, 1998
- LEGATES, D.R.; MCCABE, G.J. Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.26, p.69-86, 1999.
- LELIS, T. A. et al. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 36, p.623-634, 2012.
- Lenhart, T. et al. Comparisons of two approaches of sensitivity analysis. **Physics And Chemistry Of The Earth**. v. 27. pp 645-654, 2002.
- Li, S. G. et al. Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints. **Journal of Hydrology**, v.333, p.133-143, 2007.
- LI, Z. et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal ff Hydrology**, v. 377, n. 1-2, p.35-42, out. 2009.
- LIMA, E. M.; PINTO, J E. S. de. Bacia do rio catolé, Bahia - Brasil: bases geoambientais e socioeconômicas para a gestão da água e do solo.**Revista Geográfica de América Central**, Costa Rica, v. 2, n. 47, p.1-11, 2011.
- LINO, J. F. L. et al.. Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Brasil, 2009.
- LOPES, N. H. Y.. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, Florianópolis, 2008.

MACHADO, R. E.. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia utilizando técnicas de geoprocessamento.** 2002. 154 f. Tese (Doutorado em agronomia) – Universidade de São Paulo - Esalq, Piracicaba, 2002

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 8, p.147-155, mar. 2003.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p.43-72, 2008.

McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. **Technometrics**, v, 21, n. 2, p. 239–245, 1979.

ME, W.; ABELL, J. M.; HAMILTON, D. P.. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 19, n. 10, p.4127-4147, 13 out. 2015.

MELO NETO, J. O.. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT.** 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Sistemas Agrícolas, Ufla, Lavras, 2013

MENESES, P. R.; ALMEIRA, T. de. **INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO.** Brasília: Unb, 2012. 276 p.

MERRITT, W.S.; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J.. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 8-9, p.761-799, outubro, 2003.

MORAES, J.M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.61-70, 2003.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of The Asabe**, v. 50, n. 3, p.885-900, 2007.

MORRIS, M.D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. **Technometrics**, v. 33, n. 2, p. 161-174, Mai.1991.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290, 1970.

NEITSCH, S. L; ARNOLD, J. G; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool. Input/output file documentation:** Version 2005. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA. 2005, 530p.

NELDER, J. A.; MEAD, R.. A Simplex Method for Function Minimization. **The Computer Journal**, v. 7, n. 4, p.308-313, 1 jan. 1965.

PAIM, J. B; MENEZES, J. T. Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.3, n. 2, p.5-14, 2009.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias: estudo de caso bacia do Rio Solimões**. 2009, 168 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

PANHALKAR, S.S.. Hydrological modeling using SWAT model and geoinformatic techniques. **The Egyptian Journal Of Remote Sensing And Space Science**, v. 17, n. 2, p.197-207, dez. 2014.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V.. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia-SC. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 37, n. 5, p.859-869, 2013.

PEREIRA, D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba 2013 usando o modelo SWAT**. 2013. 436 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2013.

PIGNATARO NETO, I.T. **Qualidade física e química de um latossolo vermelho-amarelo sob pastagens com diferentes períodos de usos**. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) -Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle de erosão hídrica**. 2. Ed. Viçosa – MG: Editora UFV, 2009. v. 1. 279 p.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, V. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Brasil: Inpe, 2000. 57 p

ROCHA, J.; ROEBELING, P.; RIAL-RIVAS, M. E.. Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model. **Science of The Total Environment**, v. 536, p.48-58, dez. 2015.

RODRIGUES, E. L. et al. Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Soc. Nat.**, v. 27, n. 3, p.485-500, dez. 2015.

SANTOS, J. Y. G. dos et al. Aplicação do modelo SWAT para a simulação chuva-vazão na bacia do rio Tapacurá, estado de Pernambuco. In: xx simpósio brasileiro de recursos hídricos, 2013, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** . Bento Gonçalves: Abrh, 2013. p. 1 – 8

Sarmento, L. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**.2010, 240 f. Tese (Doutorado em Tecnologia

Ambiental e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

SATHIAN, K.; SYMALA, P.: Application of GIS integrated SWAT model for basin level water balance. **Indian J. Soil Cons.**, v. 37, p.100–105, 2009.

SCHUOL, J. et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 1-2, p.30-49, abr. 2008.

SERVAT, E.; DEZETTER, A. Selection of calibration of objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. **Hydrological Sciences Journal**, v.36, p.307–330, 1991.

SHARIDIAN, S.; et al. Utilização da equação de Hargreaves Samani para o cálculo da ETo em estufas. Congresso Ibérico de AgroIngeniería,VI.,2011, Évora, Portugal. **Anais...**,Portugal: Universidade de Évora,2011.

SILVA, M. G. da. **Modelagem ambiental na bacia hidrográfica do rio Poxim Açu/Se e suas relações antrópicas**. 2013, 223 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2013.

SILVA, R. C. et al . Alterações nas propriedades químicas e físicas de um chernossolo com diferentes coberturas vegetais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 31, n. 1, p 101-107, Fev. 2007

SILVA, T. C da; SILVA, M. T. da; SILVA, D. T. A. da; Avaliação de desempenho do modelo SWAT para estimativa da evapotranspiração potencial para a região de Petrolina, estado de Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XVII., 2015, **Anais...**João Pessoa: INPE, p. 6251 – 6257, 2015

SILVEIRA, A.L.L. 2009. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: Tucci, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. P. 35-51

SINGH, J.; H. V. KNAPP; M. D. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, **Ill.: Illinois State Water Survey**, 2004. Disponível em <http://www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/>.

SLOAN, P.G.; MOORE I.D.. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. **Water Resources Research**. Vol. 20, n. 12: 1815-1822, 1984.

SLOAN, P.G.; MOORE I.D.;COLTHARP G.B; Eigel J.D. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. **Water Resources Inst. Report 142**. Univ. Kentucky, Lexington, 1983.

TEODORO, V. L. L. et al.. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, v. 20, p.137-156, 2007.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ ABRH. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.678p.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia**: Ciência e aplicação. 3 ed. Porto Alegre, RS: FAURGS - Fundação de Apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 942p.

TUNDISI, J. G.. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Paulo , v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008 .

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T M.. Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 4, p.67-75, 05 nov. 2010.

USGS, United State Geological Survey. **Ciclo da água**. 2015. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanishhi.html>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

UZEIKA, T.. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Programa de Pós-graduação em Recursos Hidricos e Saneamento Ambiental, Ufrgs, Porto Alegre, 2009.

VAN GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 1-4, p.10-23, jun. 2006.

VAN GRIENSVEN, A. et al. Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 16, n. 9, p.3371-3381, set. 2012.

VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W.. Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, p.1-9, dez. 2003.

Van Liew, M. W et al.. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds, **J. Hydrologic Eng.** v. 12, n. 2, p.173-189, 2007.

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; BOSCH, D. D.. Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. **Transactions of The Asae**, v. 48, n. 3, p.1025-1040, 2005.

VERTESSY, R. A. et al. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2-4, p.665-700, out. 1993.