



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

– MESTRADO –

**MODELAGEM ESPACIAL E TEMPORAL DO BALANÇO HÍDRICO
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA**

Por

Isabella Carvalho de Medeiros

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

João Pessoa – Paraíba

Março de 2017



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

– MESTRADO –

**MODELAGEM ESPACIAL E TEMPORAL DO BALANÇO HÍDRICO
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Isabella Carvalho de Medeiros

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

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

M488m Medeiros, Isabella Carvalho de.

Modelagem espacial e temporal do balanço hídrico da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa / Isabella Carvalho de Medeiros. - João Pessoa, 2017.

105 f. : il.

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

1. Engenharia Civil e Ambiental. 2. Escassez hídrica - regiões semiáridas. 3. Semiárido - Paraíba. 4. Bacia hidrográfica - açude Epitácio Pessoa. 5. Modelagem hidrológica - SWAT. I. Silva, Richarde Marques da. II. Título.

UFPB/BC

**“MODELAGEM ESPACIAL E TEMPORAL DO BALANÇO HÍDRICO DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA”**

ISABELLA CARVALHO DE MEDEIROS

**Dissertação aprovada em 31 de março de 2017
Período Letivo: 2016.2**

BANCA EXAMINADORA:

Richarde Marques da Silva
Prof. Dr. Richarde Marques da Silva
Orientador

Celso Augusto Guimarães Santos
Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos
Examinador Interno

Ricardo de Aragão
Prof. Dr. Ricardo de Aragão
Examinador Externo

João Pessoa/PB
2017

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, pela oportunidade da vida.

Ao meu orientador, Richarde Marques, pela confiança que deposita em mim, sempre me fazendo crescer como pessoa e como profissional. Obrigada por todos os anos de ensinamentos e de amizade.

Aos meus amados pais, Fabíola Carvalho e Odinaldo Medeiros, que sempre me apoiaram nas minhas decisões e nunca mediram esforços para que eu chegassem onde cheguei. À minha mãe pelo exemplo de mulher forte e ao meu pai pelo exemplo de pessoa sempre disposta a ajudar.

Aos meus irmãos, Júlio César e Caio Cesar, minhas riquezas, porque eu não poderia ter irmãos (e amigos) melhores. Agradeço também por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu companheiro, Samuel Valentim, sempre presente, paciente e atencioso. Obrigada pelos ensinamentos diários que sempre me fazem crescer.

À minha bisavó Izolda Soares (*in memoriam*) que tanto me inspira e me ensinou sobre a vida. Agradeço aos meus familiares, pelos incentivos, conselhos, apoio e amizade.

A Daniel Lacuesta, pelo respeito que sempre demonstrou para com a minha família, pelo apoio e pela disponibilidade em ajudar sempre que preciso.

Aos meus sogros, Aparecida Valentim e João Afonso, por todo o apoio e palavras de incentivo. Muito obrigada por me acolherem em sua família.

A Ana Paula Xavier, minha amiga, que tive a sorte de conhecer durante a graduação em Engenharia Ambiental e que levarei para toda a vida. Obrigada por sempre estar ao meu lado enfrentando todos os desafios.

Aos companheiros do LEPPAN, que estiveram sempre dispostos ao trabalho em equipe, em especial a Alexandre Medeiros, José Carlos Dantas (Zé) e Glauciene Justino, por todos os momentos de parceria e contribuições nas pesquisas, e pela amizade que se formou.

Aos amigos que estiveram sempre ao meu lado em todos os momentos, obrigada por toda a ajuda, pelos conselhos e pela atenção. Em especial, agradeço a Jocyellen Casado e Brisa Lunar pela amizade que ultrapassa todas as barreiras e a Júlia Barbosa, que mesmo tendo

conhecido há pouco tempo, mostrou-se tão presente em todos os momentos dessa fase de Mestrado.

À banca examinadora que se dispôs a fazer parte deste processo. Meus agradecimentos ao professor Celso Santos, que me acompanha desde à graduação sempre disposto a compartilhar seus conhecimentos, e ao professor Ricardo de Aragão, que prontamente se dispôs a contribuir com essa pesquisa.

Aos professores e pesquisadores que ao longo da minha formação contribuíram com essa pesquisa.

Aos professores do PPGECAM, pelos ensinamentos ao longo desses dois anos de Mestrado e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida, permitindo que eu me dedicasse aos estudos.

A Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba pela disponibilidade dos dados mensais do Açude Epitácio Pessoa, utilizados nessa pesquisa.

E a todos que, direta ou indiretamente contribuíram com esta pesquisa e com o meu crescimento moral e intelectual.

RESUMO

A problemática da escassez hídrica é uma realidade que vem sendo intensificada em todo o mundo, sobretudo devido ao crescimento populacional e aos fatores climáticos. No Brasil, a região semiárida é uma das mais sensíveis a essa problemática. Na Paraíba, a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, de grande importância social e econômica para o Estado enfrenta, constantemente, problemas relacionados à escassez hídrica. Atualmente, o Açude Epitácio Pessoa, responsável pelo abastecimento de mais de 20 municípios, encontra-se com apenas 2,9% de sua capacidade disponível. Situação semelhante vem ocorrendo em diversas outras regiões no Estado. Neste sentido, a presente pesquisa teve como intuito modelar o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa utilizando o modelo SWAT, a fim de contribuir com a compreensão da dinâmica espaço-temporal do balanço hídrico da mesma. Para tanto, utilizou-se o período de 1970 a 1990 para a calibração do modelo e o período de 1994 a 2014 para a validação, sendo a variável modelada a vazão. Os resultados obtidos pelo modelo SWAT foram satisfatórios, de acordo com os indicadores estatísticos NSE e R^2 , que apresentaram valores, para o posto Poço de Pedras, de 0,69 e 0,69, respectivamente, e, para o posto Caraúbas, de 0,64 e 0,65, respectivamente. Estes resultados foram superiores aos valores mínimos aceitáveis ($NSE = 0,5$ e $R^2 = 0,6$), mostrando que o modelo foi calibrado. Foi realizada, em seguida, a validação do modelo que apresentou bons resultados para o posto Poço de Pedras ($NSE = 0,8$ e $R^2 = 0,87$), entretanto o posto de Caraúbas apresentou resultados estatísticos ligeiramente abaixo do desejável ($NSE = 0,41$ e $R^2 = 0,56$). Por fim, foram obtidos os valores das componentes do balanço hídrico da bacia hidrográfica, com valores médios anuais de evapotranspiração de 353,3 mm, escoamento superficial de 27,34 mm e percolação de 131,53 mm. A simulação do balanço hídrico permitiu uma maior compreensão sobre o comportamento hidrológico da mesma, mostrando resultados coerentes com o que se espera de uma bacia hidrográfica em ambiente semiárido.

PALAVRAS-CHAVE: Semiárido, SWAT, Escassez Hídrica.

ABSTRACT

The problem of water scarcity is a reality that has been intensifying all over the world, mainly due to population growth and climatic factors. In Brazil, the semi-arid region is one of the most sensitive to this problem. In Paraíba, the Epitácio Pessoa dam watershed dam, which is of great social and economic importance for the State, is constantly facing problems related to water scarcity. Currently, Epitácio Pessoa dam, responsible for supplying more than 20 municipalities, has only 2,9% of its available capacity. A similar situation has occurred in several other regions in the State. In this regard, the present research aimed to model the water balance of Epitacio Pessoa dam watershed using the SWAT model, in order to contribute to the understanding of the spatial-temporal dynamics of its water balance. For that, the period from 1970 to 1990 was used for the calibration of the model and the period from 1994 to 2014 for the validation, the modeled variable was the flow. The results obtained by the SWAT model were satisfactory, according to the statistical indicators NSE and R^2 , which presented values for Poço de Pedras station, of 0.69 and 0.69, respectively, and for Caraúbas station of 0,64 and 0.65, respectively. These results were higher than the minimum acceptable values (NSE = 0.5 and R^2 = 0.6), showing that the model was calibrated. Also, the validation of the model presented good results for Poço de Pedras station (NSE = 0.8 and R^2 = 0.87). However, Caraúbas station results were slightly lower than the desirable (NSE = 0,41 and R^2 = 0.56). Finally, the values of the water balance components of the watershed were obtained, with annual mean evapotranspiration values of 353.3 mm, surface runoff of 27.34 mm and percolation of 131.53 mm. The simulation of the water balance allowed a greater understanding of the watershed's behavior, showing results consistent with what is expected of a watershed in a semi-arid environment.

KEYWORDS: Semiarid, SWAT, Water Scarcity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.	19
Figura 2 – Precipitação média mensal na área de estudo entre os anos de 1970 e 1990, com base nos postos pluviométricos mostrados na Tabela 4. Fonte: ANA (2016) e INMET (2016).	20
Figura 3 – Vegetação típica do bioma da Caatinga, onde se observa: (a) vegetação espalhada com solo degradado e (b) presença de solo exposto. Fonte: Ferreira da Silva (2014).	21
Figura 4 – Estrato herbáceo observado próximo a um barramento no Município de São João do Cariri. Fonte: Ferreira da Silva (2014).	22
Figura 5 – Delimitação atual do semiárido brasileiro.....	25
Figura 6 – Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica.....	28
Figura 7 – Estrutura do modelo SWAT. Fonte: Ferrigo (2014).	32
Figura 8 – Fluxograma do modelo SWAT em ambiente SIG. Fonte: Silva et al. (2013)	33
Figura 9 – Representação da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa em duas sub-bacias, a bacia do Rio Taperoá e a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba.....	36
Figura 10 – Ilustração da geração das URHs no SWAT: (a) sobreposição dos mapas de vegetação, solo e classes de declividade resultando no (b) mapa das URHs. Fonte: Mota da Silva (2013).	38
Figura 11 – Esquema do movimento da água na fase terrestre e fase aquática no SWAT. Fonte: Neitsch et al. (2009).	39
Figura 12 - Distribuição da demanda evaporativa do solo em profundidade. Fonte: Neitsch et al. (2005).....	44
Figura 13 – Localização dos postos de monitoramento utilizados do estudo.	50
Figura 14 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.	53
Figura 15 – Mapa de tipos de solo da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.	55
Figura 16 - Municípios com ponto de amostragem dos perfis de solo utilizados na modelagem.	56
Figura 17 – Vista do software Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator...57	
Figura 18 – Ilustração conceitual da relação entre incerteza de parâmetro e previsão de incerteza. Fonte: Abbaspour et al. (2007).....	60
Figura 19 – Interface do programa SWAT Check. Nas abas do programa são apresentadas as informações referentes a cada processo analisado.	65

Figura 20 – Exemplo de figura gerada pelo SWAT Check, destacando os processos hidrológicos. Ao lado direito se observa o quadro Messages and Warnings, onde são apresentados os possíveis problemas da modelagem.	66
Figura 21 – Sub-bacias geradas pelo modelo SWAT na modelagem da bacia hidrográfica do Rio Taperoá.	68
Figura 22 – Sub-bacias geradas pelo modelo SWAT na modelagem da bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba.	69
Figura 23 – Vazões simulada (sem calibração) e observada para o posto fluviométrico Caraúbas.	69
Figura 24 – Vazões simulada (sem calibração) e observada com base no posto fluviométrico Poço de Pedras.	70
Figura 25 – Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT com base no posto fluviométrico Poço de Pedras.	73
Figura 26 – Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT com base no posto fluviométrico Caraúbas.	74
Figura 27 – Vazões simuladas e observadas para o posto fluviométrico Poço de Pedras.	77
Figura 28 – Vazões simuladas e observadas para o posto fluviométrico Caraúbas.	77
Figura 29 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas na etapa de calibração para os postos fluviométricos: (a) Poço de Pedras e (b) Caraúbas.	78
Figura 30 – Espacialização das médias anuais de escoamento superficial, por sub-bacia, na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de calibração (1970 a 1990).	80
Figura 31 – Espacialização das médias anuais de evapotranspiração real, por sub-bacia, para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de calibração (1970 a 1990).	81
Figura 32 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas na etapa de validação para os postos fluviométricos: (a) Poço de Pedras e (b) Caraúbas.	82
Figura 33 – Espacialização das médias anuais de escoamento superficial, por sub-bacia, na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de validação (1994 a 2014).	83
Figura 34 – Comportamento da precipitação média mensal na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa entre os anos de 1970 e 1990 (período de calibração) e 1994 e 2014 (período de validação). Fonte: ANA (2016) e INMET (2016)	84
Figura 35 – Espacialização das médias anuais de evapotranspiração, por sub-bacia, para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de validação (1994 a 2014).	84
Figura 36 - Balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa no período de 1970 a 1990. (Adaptado do SWAT Check)....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação climática com base no índice de aridez.....	24
Tabela 2 – URHs geradas a partir da combinação única de vegetação, solo e classe de declividade. Ilustrado no exemplo da Figura 6.....	38
Tabela 3 – Descrição dos postos pluviométricos e fluviométricos utilizados no estudo.	49
Tabela 4 – Descrição dos parâmetros do gerador climático do SWAT.....	51
Tabela 5 – Valores das médias mensais para os parâmetros climatológicos utilizados no gerador climático do SWAT.....	51
Tabela 6 – Descrição das imagens utilizadas na classificação do uso e ocupação do solo.	52
Tabela 7 – Distribuição do Uso do Solo na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.	53
Tabela 8 – Associação entre as classes de uso do solo existentes na bacia do Açude Epitácio Pessoa com as existentes no banco de dados do modelo SWAT.	54
Tabela 9 – Distribuição dos tipos de solo na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. ..	54
Tabela 10 – Descrição dos perfis utilizados na modelagem.....	55
Tabela 11 – Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo SWAT.....	62
Tabela 12 – Comparação entre as vazões observadas e as simuladas pelo modelo SWAT na modelagem inicial.....	71
Tabela 13 – Valores dos índices de desempenho obtidos na modelagem inicial, sem calibração (período de 1970 a 1990 para o posto Poço de Pedras e 1973 a 1990 para o posto Caraúbas). ..	72
Tabela 14 – Paramêtros mais sensíveis para bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro.....	73
Tabela 15 – Parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, em ordem decrescente de relevância.	74
Tabela 16 – Valores calibrados dos parâmetros baseados nos postos fluviométricos Poço de Pedras e Caraúbas.....	76
Tabela 17 – Comparação entre as vazões observadas (m ³ /s) e as simuladas (m ³ /s) pelo modelo SWAT após a realização da calibração.	78
Tabela 18 – Resultado dos índices de desempenho na fase de calibração (período de 1970 a 1990 para o posto Poço de Pedras e 1973 a 1990 para o posto Caraúbas).	79
Tabela 19 – Resultado dos índices de desempenho na fase de validação (período de 1994 a 2014).	82
Tabela 20 – Variáveis obtidas para o balanço hídrico na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base (dias)
ANA	Agência Nacional de Águas
ANION_EXCL	Fração de porosidade a partir da qual os ânions são excluídos
BIOMIX	Eficiência do revolvimento biológico (mm)
CANMX	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm)
CEAP	Conservation Effects Assessment Project
CFARM	Carbon Cycling Routine
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)
CH_N2	Coeficiente de Manning do canal principal (s.m ^{-1/3})
CN	Curva-número
CN2	Curva número na condição II (adim).
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
ECSJC	Estação Climatológica de São João do Cariri
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPCO	Fator de compensação de água pelas plantas (adim)
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adim)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GLUE	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água à zona não saturada (adim)
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer (mm)
HYDGRP	Grupo Hidrológico do Solo
IA	Índice de Aridez
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
KINEROS	Kinematic Erosion Model

MCMC	Mark chain Monte Carlo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MI	Ministério da Integração Nacional
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MUSLE	Equação Universal de Perda de Solo Modificada
NLAYERS	Número de Horizontes do Solo
NRCS	Natural Resource Conservation Service
NSE	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
PARASOL	Parameter Solution
PBIAS	Tendência Percentual
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PSO	Particle Swarm Optimization
QUAL2E	Enhanced Stream Water Quality Model
R ²	Coeficiente de Determinação
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (adim).
REVAPMN	Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)
ROTO	Routing Outputs to Outlets
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SLSUBBSN	Comprimento da declividade média (m)
SOL_ALB	Albedo
SOL_AWC	Capacidade de água disponível (mm H ₂ O / mm solo)
SOL_BD	Densidade aparente do solo
SOL_CRK	Fração de fissuras no solo
SOL_EC	Condutividade Elétrica
SOL_Z	Profundidade da Camada
SOL_ZMX	Profundidade da Raiz
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting

SURLAG	Coeficiente de atraso do escoamento superficial (adim)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Procedures
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins
TOPMODEL	Topography based hydrological Model
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
USDA	United States Department of Agriculture
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
USLE_K	Fator de Erodibilidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	19
2.1. O Açude Epitácio Pessoa	22
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1 Escassez hídrica em regiões semiáridas.....	24
3.2 Sistemas de Informações Geográficas	26
3.3 Modelagem hidrológica e balanço hídrico em bacias hidrográficas.....	27
3.3.1 Análise de sensibilidade de modelos hidrológicos	30
3.3.2 Calibração e validação de modelos hidrológicos	30
3.4 O Modelo SWAT.....	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 O modelo SWAT	37
4.1.1 Caracterização do modelo SWAT	37
4.1.1.1 Escoamento superficial.....	40
4.1.1.2 Evapotranspiração	41
4.1.1.3 Percolação.....	45
4.1.1.4 Água subterrânea	46
4.1.2 Dados de entrada do modelo SWAT	48
4.1.2.1 Dados hidroclimáticos e estações de monitoramento.....	48
4.1.2.2 Material cartográfico	52
4.2 SWAT-CUP	59
4.2.1 SUFI-2	59
4.2.2 Seleção dos parâmetros para a calibração e análise de sensibilidade	61
4.2.3 Calibração e validação.....	64
4.3 SWAT CHECK.....	65
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1 Modelagem inicial da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa	68
5.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT	72
5.3 Calibração do modelo SWAT	75
5.4 Validação do modelo SWAT	81
5.5 Balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.....	85
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água, sobretudo devido ao crescimento populacional e às diversas atividades produtivas que se utilizam deste recurso, aliadas à degradação ambiental dos corpos hídricos e à redução dos totais pluviométricos têm contribuído para a criação de um panorama de escassez hídrica em diversas regiões do planeta.

No Brasil, a problemática da escassez hídrica é sentida em diversas partes do país ao longo dos tempos, entretanto, nos últimos anos tem se observado uma intensificação da diminuição da disponibilidade de água. Desde 2012, segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2014), diferentes municípios do Brasil têm se deparado com reduções das precipitações, delineando um cenário complexo de escassez hídrica que tem causado graves impactos na oferta de água para o abastecimento público e outros usos, como irrigação e geração de energia elétrica.

Cirilo (2015) aponta que, no Brasil, o quadro de escassez se manifesta principalmente na região Nordeste, na parte do seu território designada como semiárida. Carvalho (2012) afirma que esta região sofre com efeitos de escassez hídrica de maneira periódica, enfrentando a ocorrência de secas que se repetem anualmente ou plurianualmente. As estatísticas das grandes secas nas regiões semiáridas indicam 30% de anos secos no século XVIII, 16% de anos secos no século XIV e 23% de anos secos no século XX (SUDENE, 1981 e VIEIRA, 1999).

Srinivasan e Paiva (2009) comentam que na região semiárida, a precipitação anual é inferior a 800 mm e geralmente concentra-se em uma única estação chuvosa, com duração de cerca de três meses, variando entre os meses de fevereiro a junho. Esses autores destacam, ainda, que o regime de precipitação apresenta grandes variações espaciais e temporais, o que propicia a ocorrência de eventos extremos de chuva e, sobretudo, de secas climatológicas e hidrológicas.

Diante do fenômeno das secas recorrentes na região semiárida brasileira, medidas vêm sendo tomadas buscando a estabilidade no abastecimento humano, podendo-se citar, como exemplo, a transposição de águas de rios e a construção de reservatórios, esta última destaca-se como uma prática que vem sendo realizada na região semiárida desde o final do século XIX, como prova da preocupação à variabilidade climática da região, sobretudo com relação às secas (MARENKO, 2008).

Nesse viés, pode-se destacar o Açude Epitácio Pessoa, popularmente conhecido como Açude de Boqueirão, que foi inaugurado em 1957, no Estado da Paraíba, e exerce uma função especial na economia local e estadual, sobretudo por abastecer, dentre outros municípios, a

cidade de Campina Grande, um dos principais núcleos urbanos do interior do Nordeste brasileiro e segundo maior centro político-econômico da Paraíba (BRITO, 2006).

A região abastecida pela bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa enfrenta grandes problemas em períodos de seca. Guedes (2011) observa que as condições hídricas da bacia do Açude são insuficientes para suprir o escoamento dos rios nos longos períodos de ausência de precipitação, o que pode levar à adoção de medidas de contenção, como o racionamento ou a proibição de irrigação, fato este que está ocorrendo atualmente, início do ano 2017, onde está sendo necessário utilizar as águas da volume morto para o abastecimento humano e o reservatório atingiu sua menor cota de volume disponível em toda a sua história de existência, de acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESÁ) (2017), apresentando apenas 2,9% de seu volume disponível e, portanto, situando-se num estado considerado crítico.

A situação crítica em que o Açude Epitácio Pessoa se encontra não é exclusiva desse reservatório. Dados da AESÁ (2017) revelam que dos 127 reservatórios monitorados na Paraíba, atualmente, 46 deles estão com menos de 5% de sua capacidade total, enquadrando-se numa situação crítica, 43 reservatórios estão em observação, com menos de 20% de sua capacidade, e apenas 38 estão com capacidade acima de 20% do seu volume total.

Diante dessa situação, evidencia-se a necessidade de uma análise espacial e temporal da hidrologia dessa região para uma melhor gestão de recursos hídricos. Nesse sentido, diante da importância econômica e social do Açude Epitácio Pessoa para o Estado da Paraíba e tendo em vista a quantidade de municípios por ele abastecidos dentro da região semiárida optou-se por escolher essa bacia hidrográfica como objeto de estudo desta pesquisa, sobretudo devido às graves crises que o reservatório enfrenta.

Frente à problemática da escassez hídrica, a integração entre modelos hidrológicos, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de geoestatística tem se destacado como importante ferramenta que permite simular os processos hidrológicos em escalas de bacias hidrográficas e auxiliar na gestão dos recursos hídricos nessa unidade territorial ambiental vital.

Fragoso Júnior et al. (2009) apontam que a busca pela gestão dos recursos hídricos deve ser fundamentada em conhecimento científico específico. Assim, estudos utilizando modelos hidrológicos contribuem para o entendimento do comportamento temporal e espacial dos processos hidroclimatológicos de bacias hidrográficas e permitem a espacialização dos resultados em ambiente computacional, além de possibilitar a geração de cenários hipotéticos de modificações no uso do solo, para analisar os impactos hidrológicos em escala de bacias hidrográficas.

Dentre os modelos existentes, pode-se citar o *Topography Based Hydrological Model* (TOPMODEL) (BEVEN e KIRKBY, 1979), modelo semi-distribuído, que representa os processos hidrológicos utilizando relações físicas; o *Kinematic Erosion Model* (KINEROS) (WOOLHISER et al., 1990), que simula a erosão, transporte e deposição de sedimentos, escoamento superficial e a qualidade da água para eventos individuais de precipitação, e o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD et al., 1998), que foi desenvolvido para prever o impacto das práticas de manejo da terra na produção de água, sedimentos e compostos químicos agrícolas em grandes e complexas bacias hidrográficas com diferentes solos, uso da terra e condições de gestão durante longos períodos de tempo.

Dentre esses modelos, o SWAT tem se destacado como uma das ferramentas mais aplicadas em todo o mundo com bons resultados (GASSMAN et al., 2007; GARBOSSA et al. 2011; SILVA et al., 2013). Esse modelo foi adotado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), no programa *Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources*, além de ser utilizado por muitas agências federais e estaduais do país, incluindo o *United States Department of Agriculture* (USDA) dentro do projeto de *Conservation Effects Assessment Project* (CEAP) (BRIGHENTI, 2015).

A grande aplicabilidade do modelo SWAT caracteriza-o, de certa forma, como uma ferramenta flexível e bem aceita pela comunidade científica, podendo ser utilizado para simular o balanço hídrico espaço-temporal em bacias hidrográficas (BRIGHENTI, 2015). Gassman et al. (2007) acrescentam que o modelo provou ser uma ferramenta eficaz para a avaliação de recursos hídricos para uma ampla gama de escalas e condições ambientais em todo o mundo. No Brasil, de acordo com Bressiani et al. (2015), 102 publicações abordando o SWAT foram realizadas entre o período de 1999 a 2013. Desta maneira, optou-se por utilizar o modelo SWAT para realizar as simulações e análises pertinentes a este estudo.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral estimar o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa com base em modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT, para auxiliar na gestão dos recursos hídricos contra a escassez hídrica nessa importante bacia do Estado da Paraíba.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa está localizada entre as coordenadas 6°80'0"S, 8°4'00"S e 35°9'00"W, 37°5'00"W (Figura 1), com área de aproximadamente 12.406 km². Essa bacia está inserida na região semiárida do Nordeste do Brasil, mais precisamente na porção central do Estado da Paraíba, sobre o Planalto da Borborema.

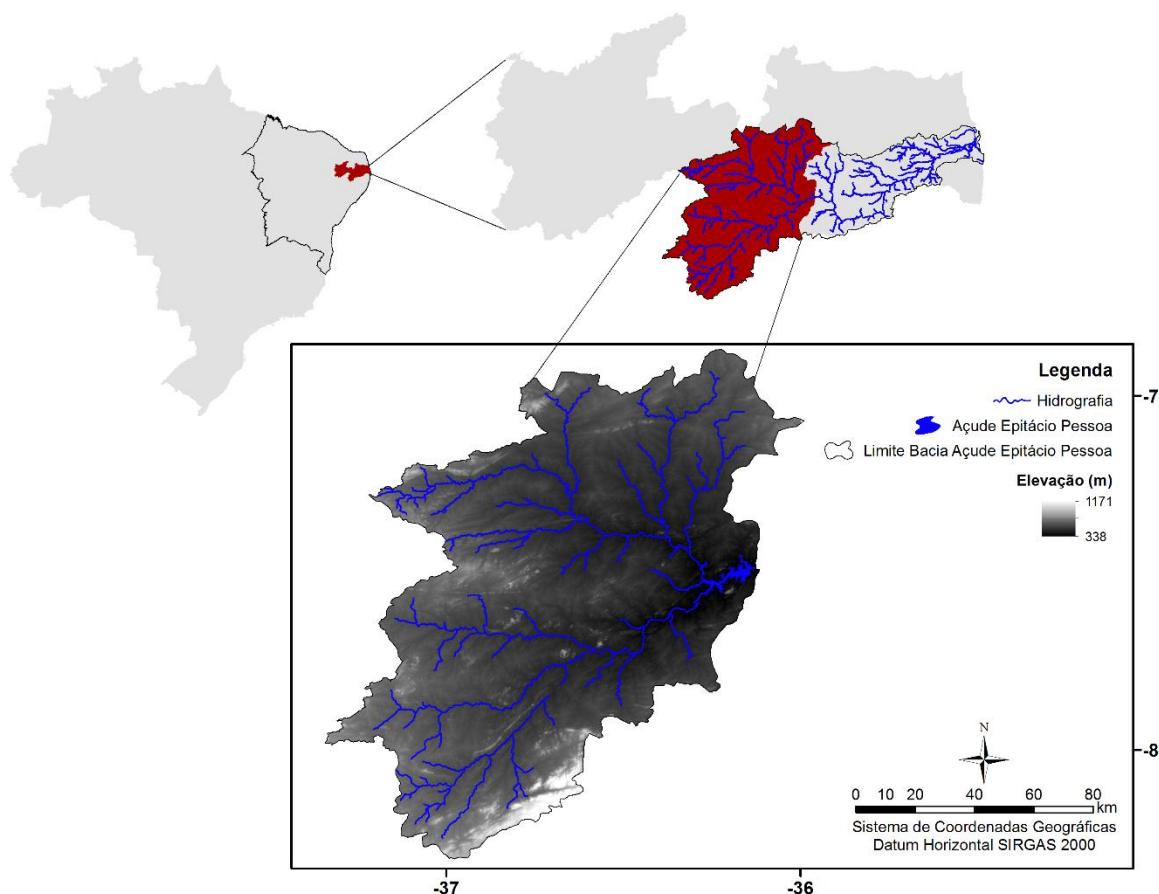


Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

As condições hídricas da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa determinam uma condição de baixos níveis, ou até mesmo nulos, de escoamento nos rios durante os longos períodos de seca, tendo em vista que os rios e lagos do semiárido são, em sua grande maioria, irregulares e de características intermitentes (GUEDES, 2011).

As temperaturas médias mensais da região se mantêm em torno dos 30°C entre os meses de novembro e fevereiro, e nos meses de junho e julho a temperatura é de aproximadamente 25°C. Com relação às taxas de insolação e evapotranspiração médias anuais, essas são de 2.800 horas/ano e 2.000 mm/ano, respectivamente (NASCIMENTO e ALVES, 2008). O relevo

é onulado a fortemente onulado, com variações hipsométricas que atingem cotas acima de 1.000 m (MARINHO e ALMEIDA, 2013) e médias pluviométricas baixas, de até 500 mm/ano (ANA, 2016; INMET, 2016). A Figura 2 mostra o comportamento da precipitação média mensal na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, para o período de 1970 a 1990.

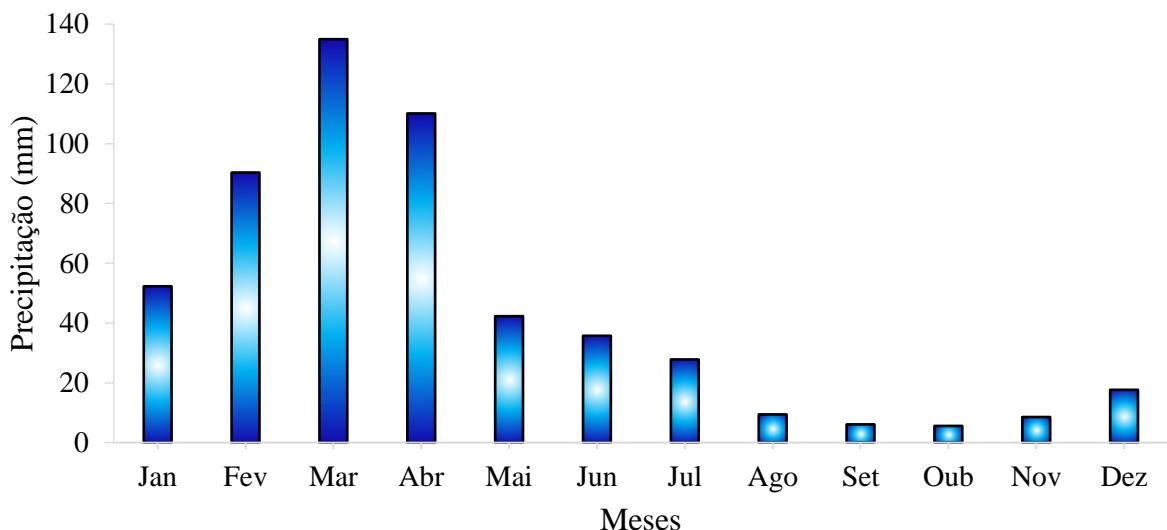


Figura 2 – Precipitação média mensal na área de estudo entre os anos de 1970 e 1990, com base nos postos pluviométricos mostrados na Tabela 3. Fonte: ANA (2016) e INMET (2016).

Quanto aos tipos de solo, os principais encontrados na região são Cambissolo, Latossolo, Luvissolo, Neossolo Flúvico, Neossolo Litólico, Neossolo Regolítico, Planossolo, Vertissolo e Argissolo Vermelho Amarelo. A vegetação que compõe a região do Cariri Paraibano, assim como a maior parte do semiárido brasileiro se caracteriza pela dominância de espécies caducifólias de natureza xerófila, com forte presença de plantas espinhosas, e com boa adaptação à seca, ou seja, uma vegetação típica do bioma Caatinga (SOUZA, 2008). Souza et al. (2009) afirmam que a variabilidade topográfica e a distribuição dos tipos de solo, bem como o clima característico da região são os principais fatores que influenciam na diferenciação do porte das espécies de vegetação presentes na região.

Neste estudo, o uso e ocupação do solo da bacia foi classificado com relação ao porte da vegetação, com base no ano de 1980, sendo constituído por: (a) vegetação arbustiva, (b) vegetação arbórea, (c) vegetação herbácea, e (d) água.

As classes de vegetação arbustiva e vegetação arbórea são as que predominam na área de estudo, sendo vegetações típicas do bioma da Caatinga. Na Figura 3, pode-se observar a representação típica do bioma da Caatinga, observada no Município de São João do Cariri. Observa-se que a vegetação difere quanto ao porte, onde a vegetação de maior porte foi

classificada neste estudo como sendo vegetação arbórea e a de menor porte como sendo vegetação arbustiva.

De acordo com Ferreira da Silva (2014), que realizou estudo no Município de São João do Cariri, as espécies que podem ser encontradas na área são (a) lenhosas: angico (*Anadenanthera colubrina*), catingueira (*Caesalpina pyramidalis Tul.*), (b) cactáceas: palmatória (*Opundia sp.*), xique-xique (*Pilosocereus gounellei*), mandacaru (*Cereus jamacaru*), facheiro (*Pilosocereus piauhinensis*), (c) pastagem: capim-mimoso (*Axonopus purpusii Nees*), e (d) arbóreas: marmeiro (*Cróton sincorensis*), mufumbo (*Cobretum leprosum*), pinhão manso (*Jatropha pohliana*), pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*).



Figura 3 – Vegetação típica do bioma da Caatinga, onde se observa: (a) vegetação espaçada com solo degradado e (b) presença de solo exposto. Fonte: Ferreira da Silva (2014).

A vegetação herbácea é aquela vegetação do tipo rasteira, principalmente a que acompanha as margens dos rios (Figura 4). Há também considerável presença de solo exposto, o que é um fato preocupante, uma vez que a ausência de cobertura vegetal deixa o solo desprotegido e susceptível à erosão, como pode também ser observado na Figura 3. Por fim, tem-se a presença da classe água, que corresponde aos corpos hídricos existentes no limite da bacia hidrográfica em estudo.



Figura 4 – Estrato herbáceo observado próximo a um barramento no Município de São João do Cariri. Fonte: Ferreira da Silva (2014).

2.1. O Açude Epitácio Pessoa

O Açude Epitácio Pessoa, conhecido popularmente como Açude Boqueirão, foi construído entre os anos de 1951 e 1956, pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS (SILVA JÚNIOR, 2013). Com 60 anos de existência, o reservatório é o segundo da Paraíba em capacidade de acumulação, e o maior da bacia do rio Paraíba.

No ano de sua inauguração, o Açude Epitácio Pessoa contava com um volume de armazenamento de 535.680.000 m³, entretanto dados da última batimetria, realizada em 2004 pela AESA (2004) revelaram uma capacidade de 411.686.287 m³, ou seja, 23,1% a menos que a sua capacidade inicial.

Além de se constituir na segunda maior reserva hídrica do Estado, sua importância cresce por ser a única fonte de abastecimento de um conglomerado urbano de 26 sedes municipais e distritos (RÊGO et al, 2013) espalhados pelas microrregiões do Curimataú Ocidental, do Cariri Ocidental e Oriental, do Seridó Paraibano Ocidental e Oriental, da Serra do Teixeira e de Campina Grande, destacando-se, entre os núcleos populacionais abastecidos, a cidade de Campina Grande, a maior do interior do Estado, e que representa um polo comercial, industrial e educacional, ressaltando, dessa forma, a importância do Açude Epitácio Pessoa para o Estado paraibano.

Os cursos de águas naturais que cortam a região em estudo e que beneficiam de alguma forma o solo e a produção agropecuária da região são os seguintes: Rio Paraíba, Riacho do Marinho Velho, Riacho da Perna, Riacho dos Canudos, Riacho da Ramada, Riacho da Relva e Riacho do Feijão.

Por localizar-se numa região de clima quente e seco, com o menor total pluviométrico do país, o reservatório é bastante vulnerável às variabilidades climáticas e aos impactos causados pelo homem, como, por exemplo, a construção de barramentos ao longo dos cursos principais do rio, que fazem o reservatório passar por constantes períodos de iminência de colapso, quer seja com relação à quantidade de água disponível ou com relação à qualidade de água do sistema de abastecimento da região e cidades circunvizinhas (LIMA et al., 2014). Atualmente, no início de 2017, o reservatório está passando pela maior crise ao longo de toda a sua existência, restando apenas 3,5% do seu volume total (AESÁ, 2017).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Escassez hídrica em regiões semiáridas

Problemas relacionados à escassez hídrica manifestam-se em todo mundo, sobretudo devido à distribuição irregular, tanto temporal quanto espacialmente da água na superfície da Terra. Esses problemas podem, ainda, ser agravados mediante a má gestão dos recursos hídricos. Dentre as regiões submetidas aos cenários de escassez de água, as semiáridas são sujeitas a uma maior variabilidade de chuvas, produzindo períodos de estiagem aguda, e, ao mesmo tempo, propiciando eventos extremos de precipitação (MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2012), por vezes concentrando o volume previsto para toda a quadra chuvosa em apenas um dia.

Do ponto de vista climático, a definição de semiárido vem da classificação do clima de Thornthwaite (AYOADE, 1988), que o definiu em função do Índice de Aridez (IA), que é reconhecido como a razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial. A Tabela 1 apresenta a faixa do índice de aridez para diversos climas da terra.

Tabela 1 – Classificação climática com base no índice de aridez.

Índice de Aridez (IA)	Classificação
IA < 0,05	Hiper árido
0,05 < IA < 0,20	Árido
0,20 < IA < 0,50	Semiárido
0,50 < IA < 0,65	Subúmido seco
0,65 < IA < 1,00	Subúmido úmido
IA > 1,00	Úmido

Fonte: Instituto Nacional do Semiárido – INSA (2011)

Em complemento à definição de semiárido de acordo com o IA, o Ministério da Integração Nacional – MI definiu, em 2005, uma nova delimitação do semiárido brasileiro a partir de três critérios técnicos (MI, 2005):

- i. precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 mm;
- ii. índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico, que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990;
- iii. risco de seca maior que 60% tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

Com base nesses critérios, tem-se que o semiárido brasileiro apresenta uma área territorial de 980.133,07 km², abrangendo 1.135 municípios, destes, 1.050 estão situados em

oito estados do Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe) e os demais 85 municípios pertencem a Minas Gerais, região Sudeste do Brasil (INSA, 2013) (Figura 5).



Figura 5 – Delimitação atual do semiárido brasileiro.

Fonte: INSA (2013).

A ocorrência da água no semiárido é marcada por sua grande variabilidade espacial e temporal, com precipitações de verão (dezembro-fevereiro) e de outono (março-maio), tendo a porção sul do semiárido a maior precipitação de verão, enquanto a parcela setentrional as precipitações de outono (INSA, 2011).

Esse regime de chuvas característico da região semiárida incidente sobre os solos rasos, devido ao embasamento cristalino no Planalto da Borborema, impõe a existência de rios intermitentes devido à falta de escoamento de base (CIRILO, 2008). Adicionalmente, ocorre uma significativa variabilidade interanual que impõe secas e cheias severas, sobreposta à variabilidade plurianual (decadal) que produz sequências de anos secos ou úmidos.

A escassez da água em regiões semiáridas tem sido tema de debates, políticas e pesquisas com o objetivo principal de subsidiar as ações capazes de permitir o seu aproveitamento racional, permitindo a convivência da população com os períodos de seca ou reduzida precipitação (GHEYI et al., 2012). Santos (2009) alerta que a escassez de água no

semiárido brasileiro prejudica o desenvolvimento das atividades produtivas, tendo como consequência, prejuízos econômicos e sociais.

O INSA (2011) aponta que a escassez devida à alta variabilidade temporal do regime fluvial tem sido enfrentada com a construção de infraestrutura física de transporte da água no tempo: os reservatórios. Reservatórios de menor porte são capazes de compensar apenas a sazonalidade do regime de vazões (transportando a água do período úmido de cada ano para o período seco do mesmo ano). Outros reservatórios podem transportar água do período úmido de um ano para os anos subsequentes, face à variabilidade interanual, sendo esses os médios e grandes reservatórios. Entretanto, a variabilidade de escala decadal ou multidecadal (décadas secas ou úmidas) não é mitigada pelos reservatórios, podendo, em certas situações, vir a sê-lo através de infraestrutura de transferências hídricas.

Diante das fragilidades apresentadas, características das regiões semiáridas, com relação à escassez hídrica, torna-se evidente a necessidade de uma gestão eficaz dos recursos hídricos dessa região, visando estabelecer uma segurança hídrica, de modo a garantir o suprimento de água necessário ao abastecimento humano e ao crescimento econômico.

3.2 Sistemas de Informações Geográficas

Ao analisarem-se sistemas ambientais, tais como bacias hidrográficas, informações acerca de sua localização, distribuição do uso e ocupação do solo, pontos de vulnerabilidade existentes, entre outras, tornam-se essenciais para o melhor entendimento destes sistemas, e consequentemente às tomadas de decisão baseadas nestas informações mostram-se mais eficientes.

Os SIGs são ferramentas computacionais utilizadas para coletar, armazenar, verificar, agregar, manipular, analisar e exibir dados georreferenciados (GREGORY, 2007). Ferrigo (2011) acrescenta que estas manipulações permitem agregar dados de diferentes fontes (imagens de satélite, modelos de elevação digital, mapas topográficos, mapas de solos, mapas de uso de solo, hidrografia, etc.) e em diferentes escalas. Sendo os resultados destas manipulações, geralmente apresentados sob a forma de mapas temáticos com as informações desejadas.

Atualmente, através dos SIGs, pode-se obter uma descrição espacial detalhada de variáveis de determinada região em estudo vinculadas a modelos hidrológicos distribuídos, contribuindo assim para se conhecer com maiores detalhes os processos complexos que, quando

analizados de forma conjunta, convergem para uma maior precisão para análise do fenômeno (GOMES E RODRIGUES, 1998).

Modelos hidrológicos distribuídos auxiliam no entendimento de peculiaridades que individualizam ou particularizam áreas semelhantes dentro daquela maior que é estudada, e, tais observações são expressas nos dados de entrada e saída. A integração desses modelos com os SIGs permite a espacialização das propriedades físicas e características das bacias para a modelagem, além da visualização espacial da distribuição dos resultados dos processos hidrossedimentológicos, e produção de mapas temáticos (SANTOS, 2016).

Dentre as variáveis comumente utilizadas como dados de entrada em modelos hidrológicos que podem ser fornecidas pelos SIGs pode-se citar tipo e uso do solo, cobertura vegetal, relevo e distribuição de feições hidrológicas (MELO et al., 2008).

3.3 Modelagem hidrológica e balanço hídrico em bacias hidrográficas

De acordo com Cruz e Tucci (2008), bacias hidrográficas podem ser consideradas como sistemas fechados, onde ocorrem os processos hidrológicos, e têm como resposta à precipitação que ocorre sobre as mesmas, a vazão no tempo que representa a integração dos efeitos da precipitação, tipo e uso do solo, geologia e morfologia da bacia.

O monitoramento e a análise dos processos hidrológicos que ocorrem nos limites das bacias hidrográficas é uma tarefa bastante difícil, e em muitos casos inviável, devido a sua complexidade. Nesse sentido, modelos hidrológicos surgem como ferramentas que podem ser utilizadas para auxiliar nessas tarefas. De acordo com Tucci (2005), a modelagem hidrológica é um dos meios que o homem desenvolveu para melhor compreender, simular e representar o comportamento da bacia hidrográfica e, com isso, prever condições diferentes das observadas.

Modelos são constituídos por equações que representam as condições e as características físicas de uma bacia hidrográfica, e têm como função auxiliar no entendimento do comportamento hídrico nas bacias, ou seja, são ferramentas que podem ser utilizadas para a simulação do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, como é o caso do modelo SWAT.

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica é ponto fundamental para fins de planejamento ou gerenciamento dos recursos hídricos. De acordo com Facco (2008), o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica quantifica os fluxos de água, ou seja, contabiliza as entradas e saídas de água, na unidade física em questão em um determinado intervalo de tempo. Esquematicamente, o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica encontra-se representado na Figura 6.

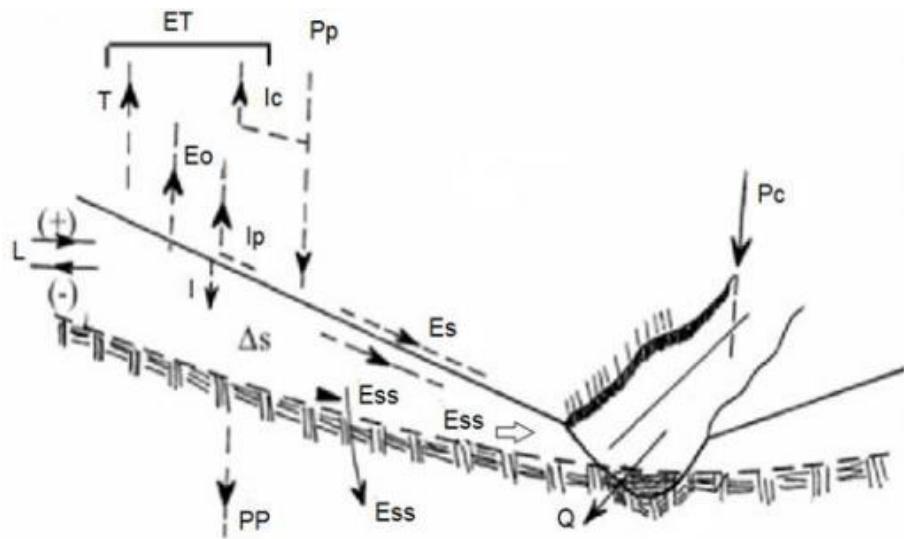


Figura 6 – Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica.

Fonte: Lima (2008).

Pp = precipitação total; T = transpiração; Ic = interceptação pelas copas das árvores; Ip = interceptação pelo solo; Eo = evaporação do solo e de superfícies líquidas; ET = evapotranspiração (total de perdas por evaporação); Q = deflúvio ($Es+Ess+Eb$); ΔS = variação do armazenamento da água do solo; L = vazamento freático; PP = percolação profunda (vazamento por falhas na rocha); Es = escoamento superficial (em canais ou para superfície), se assemelha ao escoamento ou vazão direta (Qd); Ess = escoamento subsuperficial, se assemelha ao escoamento ou vazão de base (Qb); I = infiltração; Pc = precipitação direta nos canais.

O sistema hídrico é bastante complexo, pois envolve diversos fenômenos hidrológicos que dificultam o seu entendimento. Mesmo que alguns fenômenos hidrológicos sejam comuns, tais como, a chuva e o escoamento superficial, é inadequado crer que se tem o domínio sobre todas as leis naturais que os regem, tendo em vista suas características essenciais de variabilidade no tempo e espaço e as inúmeras variáveis envolvidas (PINTO et al., 1976).

O modelo SWAT baseia-se na equação do balanço hídrico para a simulação do ciclo hidrológico, permitindo que as componentes do balanço hídrico sejam estimadas. O cálculo do balanço hídrico é fundamental para planejamento de recursos hídricos, permitindo efetuar a contabilidade hídrica no solo, até a profundidade explorada pelas raízes, computando-se, sistematicamente, todos os fluxos hídricos no solo, sejam positivos (entrada de água) ou negativos (saída de água). Estes fluxos são decorrentes de trocas com a atmosfera (precipitação, condensação, evaporação e transpiração) e do próprio movimento superficial (escoamento) e subterrâneo (percolação) da água (VAREJÃO-SILVA, 2006). De acordo com Facco (2004), o balanço hídrico é condicionado fundamentalmente pelo estado físico da atmosfera e pela natureza da superfície do solo, podendo ser verificado déficit ou excesso hídrico, no local considerado, com variações intra e interanuais.

Kuwajima (2012) comenta que a utilização de modelos hidrológicos em bacias hidrográficas permite entender e reproduzir eventos que ocorreram no passado de forma a permitir que se possam planejar eventos semelhantes no futuro. Os modelos permitem, ainda, simular e avaliar o impacto que mudanças ocorridas no uso e ocupação do solo, nos cursos dos rios ou no entorno de reservatórios possam influenciar a disponibilidade e a qualidade da água em uma bacia. Dessa forma, os modelos podem ajudar na proteção e no uso racional dos recursos hídricos, bem como auxiliar a melhoria e a prevenção de problemas relacionados a estes recursos.

Acerca da utilização do modelo SWAT e análise do balanço hídrico, pode-se citar alguns trabalhos realizados nesta perspectiva: Sergio (2013) estimou o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Sul – SC – utilizando o modelo SWAT; Rodrigues et al. (2015) aplicaram o SWAT para investigar a influência dos reflorestamentos na manutenção e no equilíbrio do ciclo hidrológico na bacia do Rio Pará e, como resultados, observaram a eficiência da modelagem ambiental como método, a fim detectar impactos no balanço hídrico decorrentes de alterações da cobertura vegetal; Nogueira (2015) aplicou o SWAT na bacia hidrográfica do Rio Camboriú – SC – para avaliação de seu uso como ferramenta de auxílio à gestão de recursos hídricos, e uma de suas análises foi o balanço hídrico.

Diversos são os tipos de modelos existentes e a aplicação adequada de cada um deles pode variar de acordo com o objetivo a ser atingido em determinada pesquisa ou projeto, devendo-se levar em consideração, ainda, alguns fatores como a disponibilidade de dados, a familiaridade do pesquisador com o modelo e as características da bacia hidrográfica em questão. Tucci (2005) sugere a seguinte classificação para sistemas e modelos:

- Contínuo e discreto – um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, enquanto que o sistema é discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos, ou seja, mesmo que um sistema se comporte continuamente, para efeitos de projeto os registros são efetuados em intervalos de tempo.
- Concentrado e distribuído – um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial e distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço.
- Estocástico e determinístico – Dooge (1973) definiu que a diferença entre sistemas determinísticos e estocásticos é a seguinte: quando, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída, o sistema é dito determinístico, enquanto que o sistema é estocástico quando o relacionamento entre a entrada e a saída é estatístico.

- Conceitual e empírico – um modelo é dito conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos, enquanto que os modelos empíricos são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

Melo (2010) afirma que a eficiência do modelo hidrológico está intimamente ligada com a qualidade dos dados envolvidos nos processos de simulação e que uma das grandes dificuldades relacionadas com os modelos, principalmente os distribuídos, é a grande quantidade de dados envolvidos nos mesmos. Nesse sentido, Tucci (2005) afirma que os SIG e o Sensoriamento Remoto auxiliam na aquisição dos dados físicos, fazendo parte da estrutura de entrada de alguns modelos, como é o caso do modelo SWAT.

A grande aplicabilidade que modelos hidrológicos têm nos dias atuais, gera a necessidade de métodos que possam identificar o quanto bem o modelo está representando a realidade. De acordo com Brightenti (2015), os procedimentos básicos de adequação e verificação de um modelo hidrológico a uma bacia hidrográfica são: análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração, validação, e verificação da eficiência dos resultados com base na série histórica disponível. Estes procedimentos serão destacados a seguir.

3.3.1 Análise de sensibilidade de modelos hidrológicos

A análise de sensibilidade objetiva avaliar quanto os resultados dos modelos hidrológicos são sensíveis às suas variáveis ou parâmetros. Este método identifica parâmetros que têm ou não uma influência significativa nas simulações (MCCUEN e SNYDER, 1986; VAN GRIENSVEN et al., 2006). A quantidade excessiva de parâmetros é um problema conhecido em modelos hidrológicos, sobretudo, em modelos distribuídos e semi-distribuídos. Dessa forma, métodos para reduzir o número de parâmetros na calibração, como, por exemplo, por análise de sensibilidade, são importantes técnicas para a análise da calibração de parâmetros de modelos hidrológicos (VAN GRIENSVEN et al., 2006).

Vale salientar que o desconhecimento dos parâmetros mais sensíveis pode ocasionar resultados menos eficientes, e tempo gasto de forma desnecessária em ajustes nas simulações (LENHART et al., 2002). Além disso, o conhecimento do usuário sobre a área de estudo é de extrema importância, pois este conhecimento será decisivo na determinação das variáveis a serem ajustadas.

3.3.2 Calibração e validação de modelos hidrológicos

O processo de calibração consiste em encontrar a melhor faixa de valores para os parâmetros selecionados de modo que os valores simulados e observados se aproximem. Este processo pode ser realizado por tentativa e erro (forma manual) ou por forma semiautomática e automática, que utilizam algoritmos para tentar minimizar as diferenças entre os valores observados e simulados, sobretudo por meio de funções objetivo (FRAGOSO JÚNIOR. et al., 2009).

De acordo com Brightenti (2015), a maioria dos estudos de calibração envolve a otimização dos parâmetros na comparação dos resultados das simulações com os dados observados disponíveis. A autora destaca, ainda, que é necessário determinar valores iniciais para os parâmetros, os quais servem como ponto de partida para a calibração. Beven (2001) alerta que os valores dos parâmetros determinados na calibração são válidos apenas na estrutura do modelo para qual a calibração foi realizada, podendo não ser adequado o uso desses resultados em outros modelos ou diferentes bacias hidrográficas.

A validação de um modelo, por sua vez, surge como etapa subsequente à calibração, consistindo em rodar o modelo com os valores de parâmetros determinados na calibração para uma série de dados distinta da série da calibração (ARNOLD et al., 2012). Desta forma, deve-se destinar um período de dados para a validação, que demonstrará se o modelo é capaz de realizar simulações aceitáveis.

3.4 O Modelo SWAT

O SWAT é um modelo hidrossedimentológico, semi-físico, semi-distribuído e contínuo no tempo, que foi desenvolvido para simular os impactos das mudanças no uso do solo, sedimentos e nutrientes em bacias hidrográficas de pequeno, médio e grande porte. Sua elaboração é fruto de mais de 30 anos de trabalhos em modelagem dirigidos pelo *United States Department of Agriculture – USDA e Agricultural Research Service – ARS*.

Nos modelos semi-distribuídos a discretização permite agregar no nível de sub-bacias (estas ligadas por uma rede de drenagem) unidades menores que têm características físicas homogêneas, como uso do solo, tipo do solo e declividade (BELLON, 2014).

O SWAT tem como objetivo simular o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, entre outros, requerendo como dados de entrada informações sobre chuva, temperatura, umidade, solos, relevo e mapas de uso do solo (SILVA et al., 2011).

De acordo com Ferrigo (2014), o modelo SWAT atual é descendente direto do *Simulator for Water Resources in Rural Basins* – SWRRB (WILLIAMS et al. 1985), bem como do *Routing Outputs to Outlets* – ROTO (ARNOLD et al., 1995), *Enhanced Stream Water Quality Model* – QUAL2E (BROWN E BARNWELL, 1987) e *Carbon Cycling Routine* – CFARM (KEMANIAN, 2011). O SWAT dispõe, ainda, de um gerador de clima, uma rotina de transporte de sedimentos e um submodelo de água subterrânea (NEITSCH et al., 2011; ARNOLD et al., 2012). Desde a sua criação, no início da década de 1990, o modelo tem passado por inspeções contínuas e expansão das suas capacidades (NEITSCH et al., 2011). A Figura 7 apresenta de forma esquemática a atual estrutura do SWAT.

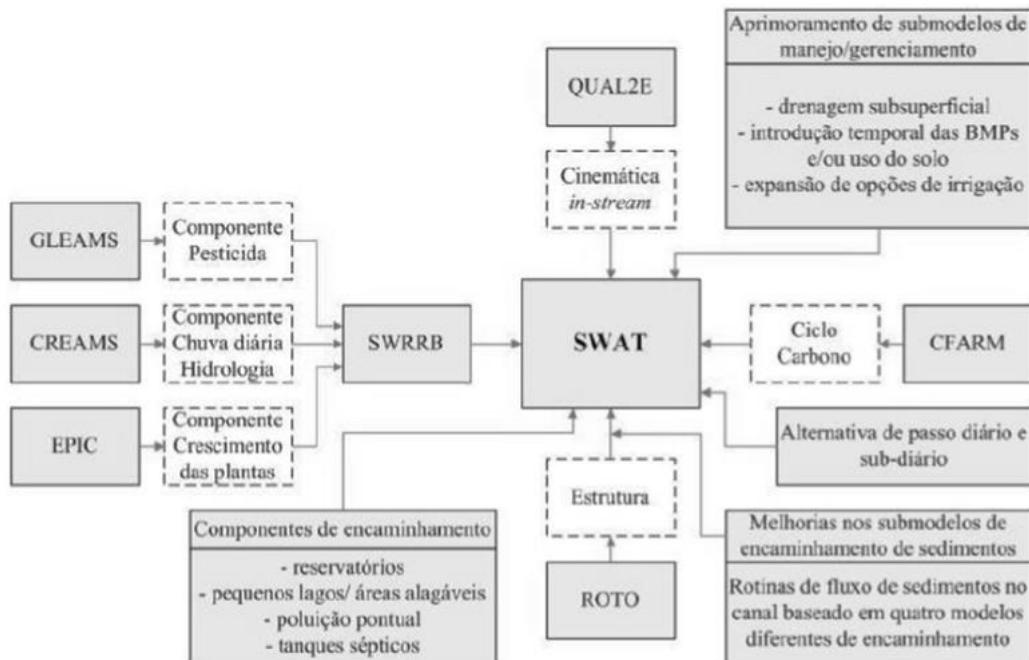


Figura 7 – Estrutura do modelo SWAT. Fonte: Ferrigo (2014).

O SWAT dispõe de uma interface amigável integrada a um SIG que facilita o processo de configuração dos arquivos de entrada do modelo, chamada ArcSWAT. Esta interface é capaz de extrair informações de dados existentes nos Modelos Digitais de Elevação (MDE), mapas de tipo do solo e uso e ocupação do solo, por exemplo, que são utilizados como dados de entrada. A Figura 8 apresenta o fluxograma do modelo SWAT em ambiente SIG.



Figura 8 – Fluxograma do modelo SWAT em ambiente SIG. Fonte: Silva et al. (2013)

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas utilizando o modelo SWAT, dentre elas, podem-se destacar: Bonumá (2011), Carvalho Neto (2011), Yan et al. (2013), Ogbu e Mbajiorgu (2013), Ferrigo (2014), Narsimlu et al. (2015), Brighenti (2015), Santos (2016).

Bonumá (2011) utilizou o SWAT para avaliar os processos hidrológicos, a produção de sedimentos e a transferência de fósforo na bacia hidrográfica do Arroio Lino, no Sul do Brasil, com uma área de 4,18 km². A calibração foi realizada com o algoritmo *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA). Os valores obtidos para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) foram 0,87 na calibração e 0,76 na validação, para a simulação de vazões mensais. A autora introduziu, ainda, uma nova rotina de sedimentos dentro do SWAT, o que gerou uma melhora na calibração da produção de sedimentos, apresentando um valor de NSE de 0,7, enquanto que sem a nova rotina o valor de NSE foi de -0,14. Quanto à carga de fósforo, as previsões foram na ordem de grandeza das cargas medidas; no entanto, o modelo não conseguiu prever satisfatoriamente as cargas de fósforo em três sub-bacias.

Carvalho Neto (2011) aplicou o modelo hidrossedimentológico SWAT para a Bacia Hidrográfica do Riacho Namorados, em São João do Cariri – PB. Avaliou-se a influência da presença dos açudes na região e as alterações decorrentes de mudanças no uso do solo, através de quatro cenários: vegetação nativa, reflorestamento com Algaroba, monocultura de milho e

totalmente desmatada. Os resultados demonstraram que a influência dos açudes na bacia foi caracterizada pela atenuação da vazão líquida e da carga de sedimentos e entre os cenários simulados, verificou-se que a situação do reflorestamento com Algaroba protegeria a bacia melhor do que a caatinga e, a cultura de milho é apenas melhor que o solo nu em termos da erosão.

Yan et al. (2013) fizeram uma aplicação integrada envolvendo o modelo SWAT e regressão por mínimos quadrados parciais para quantificar as contribuições das mudanças de uso do solo na vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Du, em sua parte superior, na China. Os resultados demonstraram que as vazões foram afetadas principalmente pelas mudanças nos usos do solo em terras agrícolas, florestas e áreas urbanas, já para a produção de sedimentos as variáveis que mais influenciaram foram as alterações nas terras agrícolas e nas florestas, entre o período de 1978 a 2007. Os autores constataram ainda que as mudanças na pastagem não exerceram influência significativa sobre qualquer vazão ou produção de sedimentos.

Ogbu e Mbajiorgu (2013) aplicaram o modelo SWAT para simular vazões e descargas de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Ebonyi, sudeste da Nigéria, para diferentes cenários de uso e ocupação do solo. Como resultados, obteve-se que com a alteração do uso do solo original da bacia para um incremento com agricultura, a produção de vazão e sedimentos aumentaram consideravelmente, chegando a ter um acréscimo de 23% para vazões e 99% para a produção de sedimentos, no pior cenário.

Ferrigo (2014) teve como objetivo avaliar a representatividade dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática das vazões de uma bacia hidrográfica, para utilização em outras cinco bacias que contribuem para o lago Descoberto, no Distrito Federal. A calibração dos parâmetros foi realizada em nível diário para os anos hidrológicos de 2005 a 2010 e foi considerada satisfatória, apresentando valor de NSE de 0,4 e valor do coeficiente de determinação (R^2) de 0,44. Na validação, foi utilizado o período de 2010 a 2013 e se obteve um NSE de 0,48 e um R^2 de 0,46. A verificação da representatividade dos parâmetros para as cinco bacias em estudo foi feita em nível mensal, e apenas uma das bacias apresentou resultado insatisfatório.

Narsimlu et al. (2015) calibraram e validaram o modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Rio Kunwari, na Índia, a fim de simular a vazão e fornecer apoio aos gestores de recursos hídricos da região. A calibração e análise de incertezas foram realizadas por meio do algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting – SUFI-2*, onde o período selecionado para a calibração foi de 1987 a 1999, sendo os primeiros três anos utilizados como período de aquecimento do modelo

e, para a validação, foi selecionado o período de 2000 a 2005. O desempenho do modelo foi verificado através dos indicadores estatísticos NSE e coeficiente de determinação (R^2) apresentando valores de NSE e R^2 , respectivamente de 0,74 e 0,77 para a calibração e 0,69 e 0,71 para a validação.

Brighenti (2015) testou métodos de calibração hierárquicos para o modelo SWAT, utilizando como área de estudo a bacia hidrográfica do Rio Negrinho, SC, com área de 198,5 km². Foi realizada análise de sensibilidade dos parâmetros e calibração automática por meio do algoritmo SUFI-2, utilizando testes de crescente complexidade. Como resultados, a autora apontou que a eficiência do modelo SWAT depende da quantidade de dados disponíveis e do período de calibração. Salientou, também, que para simulação de cenários climáticos e de mudanças de uso do solo o modelo deve ser calibrado e validado usando dados espacialmente bem distribuídos e uma série de vazões suficientemente representativa, que considerou períodos secos e úmidos.

Santos (2016) utilizou o modelo SWAT para analisar as implicações das mudanças no clima e uso do solo nos processos hidrossedimentológicos da Bacia do Rio Tapacurá, localizada no Estado de Pernambuco, Nordeste brasileiro. A modelagem da Bacia do Rio Tapacurá, pelo modelo SWAT, apresentou bons resultados, com valores de R^2 , NSE e tendência percentual (PBIAS) satisfatórios, tanto na fase de calibração e validação da vazão, quanto na verificação da produção de sedimentos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada para a realização desta pesquisa fundamentou-se na utilização do modelo SWAT para a modelagem da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa e obtenção do seu balanço hídrico. Esse modelo requer, para a sua aplicação, a inserção de uma série de dados referentes à área a ser analisada, tais como: (a) dados referentes à precipitação, (b) tipos de solo da região, (c) uso de solo, entre outros.

Esse dados foram inseridos no modelo SWAT utilizando a interface ArcSWAT em ambiente SIG, que tem como função organizar e preparar os dados de entrada para esse modelo. Em seguida será mostrada a ferramenta *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP), utilizada para análise de sensibilidade e autocalibração do modelo, além dos dados utilizados para a modelagem. Por fim, para a visualização do balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa foi utilizada a ferramenta SWAT Check.

Deve-se destacar que para efeitos deste estudo, o reservatório Epitácio Pessoa não foi incluído na modelagem, sendo considerada na modelagem apenas a área à montante do reservatório e, por conseguinte, obtendo como resposta o fluxo que chega até o reservatório. Vale salientar, também, que para as etapas de calibração e validação, a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa foi analisada em duas sub-bacias (Figura 9), as bacias hidrográficas do Rio Taperoá e do Alto Curso do Rio Paraíba.

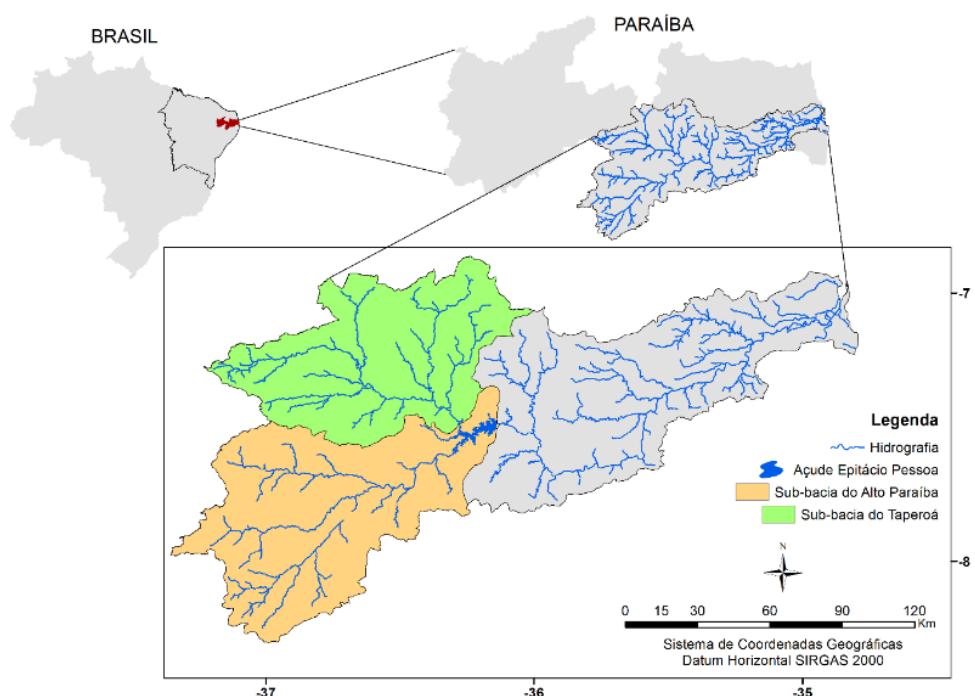


Figura 9 – Representação da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa em duas sub-bacias, a bacia do Rio Taperoá e a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba.

A bacia hidrográfica do Rio Taperoá foi calibrada e validada com base nos dados observados do posto fluviométrico Poço de Pedras e a bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba foi calibrada e validada com base no posto fluviométrico Caraúbas. Embora tenham sido realizados dois projetos para a calibração e validação do modelo, posteriormente, na seção que abordará os dados de entrada do modelo, estes serão apresentados de maneira unificada, compreendendo toda a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, ao invés de ser apresentado mapas específicos da bacia do Rio Taperoá e do Alto Curso do Rio Paraíba. Optou-se por assim proceder a fim de obter uma maior facilidade de compreensão na apresentação dos dados de entrada.

4.1 O modelo SWAT

4.1.1 Caracterização do modelo SWAT

Os componentes simulados pelo SWAT incluem hidrologia, meteorologia, erosão, crescimento de plantas/culturas, gestão do uso da terra e nutrientes (BRIGHENTI, 2015). Para a modelagem, o SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias e gera a rede de drenagem com base nas características topográficas do terreno (SANTOS, 2016). Cada sub-bacia pode ser subdividida em URHs, que por sua vez, não interagem entre si, ou seja, as cargas de nutrientes, escoamento, sedimentos, etc. são calculadas em cada URH e depois somadas para determinar as cargas totais das sub-bacias.

De acordo com Brightenti (2015), o funcionamento do SWAT será sempre função do balanço hídrico existente na bacia hidrográfica, no qual é aplicado o conceito das Unidades de Resposta Hidrológicas – URHs, onde cada uma destas é composta por uma única combinação entre cobertura, declividade e tipo de solo.

Mota da Silva (2013) ilustrou a definição de URH com base na Figura 10, na qual considerou um conjunto de três mapas com 30 células (5×6), com três tipos de cobertura vegetal, dois tipos de solo e dois tipos de classes de declividade, respectivamente (Figura 10a). Estes mapas foram sobrepostos de tal forma que todas as células com mesma combinação de vegetação, solo e classe de declividade produzissem um mapa (Figura 10b), no qual foi atribuído um número identificador único (Figura 10b e Tabela 2), que representa cada URH.

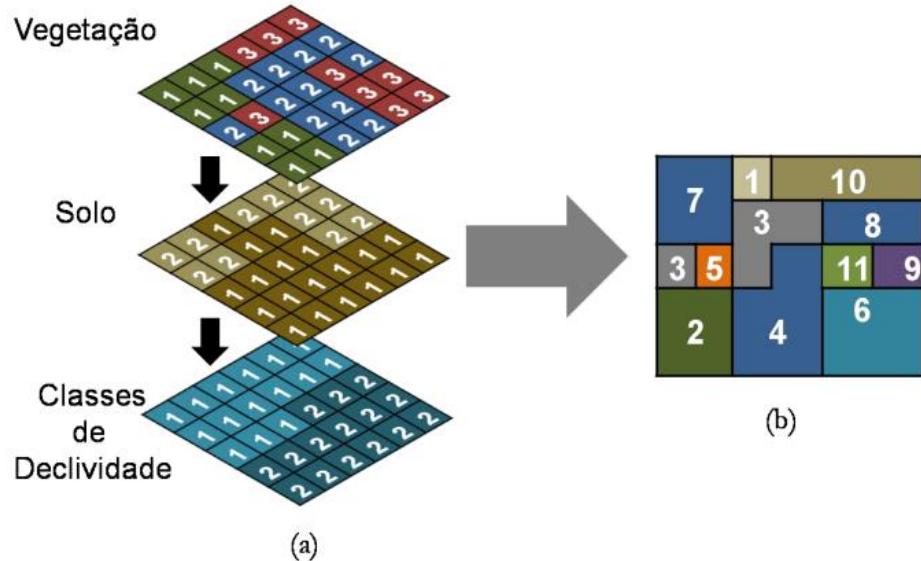


Figura 10 – Ilustração da geração das URHs no SWAT: (a) sobreposição dos mapas de vegetação, solo e classes de declividade resultando no (b) mapa das URHs. Fonte: Mota da Silva (2013).

Tabela 2 – URHs geradas a partir da combinação única de vegetação, solo e classe de declividade. Ilustrado no exemplo da Figura 6.

URH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vegetação	1	1	2	2	3	3	1	2	2	3	3
Solo	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
Classe-declividade	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2

De acordo com Neitsch (2009), o modelo SWAT calcula os fluxos para cada URH, em seguida, esses resultados são acumulados para gerar o balanço em cada sub-bacia; por fim, estes são direcionados para a rede de drenagem até atingirem a seção de controle. Posteriormente será detalhado o equacionamento do balanço hídrico pelo modelo SWAT.

A simulação hidrossedimentológica realizada pelo SWAT divide-se em duas fases: terrestre e de propagação do ciclo hidrológico. A primeira é a fase terrestre do ciclo hidrológico, que controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas carregados para o canal principal em cada sub-bacia. Já a segunda divisão, é a fase aquática do ciclo hidrológico, que pode ser definida pela propagação desses elementos através da rede de canais da bacia até o seu exutório (NEITSCH et al., 2011) (Figura 11).

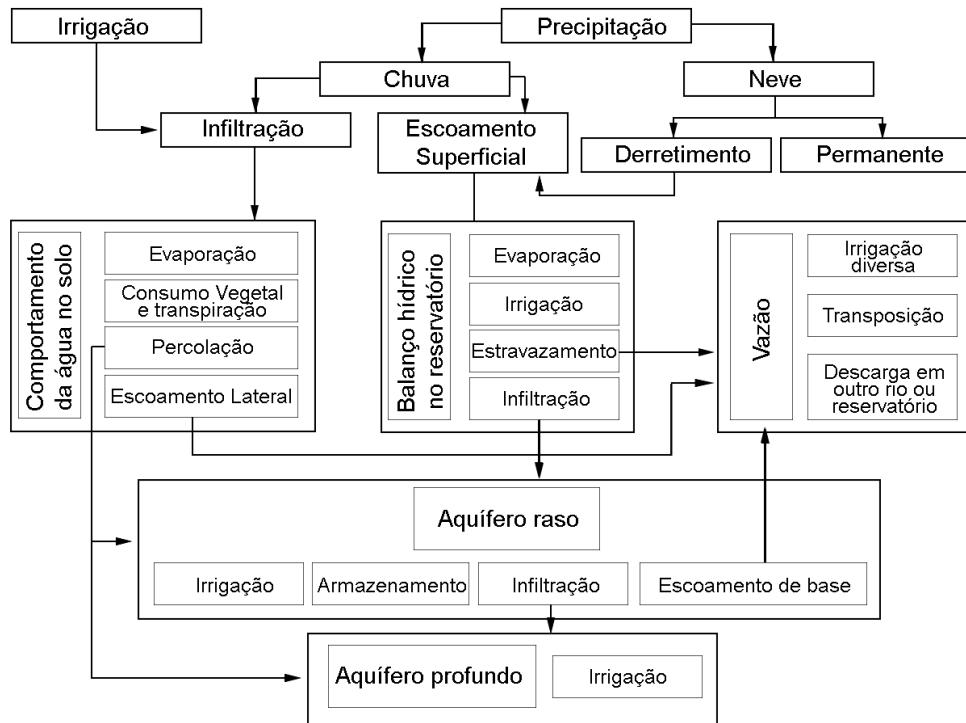


Figura 11 – Esquema do movimento da água na fase terrestre e fase aquática no SWAT.
Fonte: Neitsch et al. (2009).

Os processos hidrológicos simulados pelo SWAT incluem a interceptação e armazenamento nas copas das árvores, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, fluxo lateral, drenagem subsuperficial, redistribuição da água no perfil do solo, o uso de água através de bombeamento (se houver), fluxo de retorno e recarga por infiltração de águas superficiais, lagoas, canais e tributários (FERRIGO, 2014).

As descrições completas dos processos e as equações utilizadas pelo modelo são documentadas no manual teórico do SWAT em Neitsch et al. (2009) e em Arnold et al. (1998). A seguir serão descritas, de maneira simplificada, as equações utilizadas pelo SWAT pertinentes aos itens de interesse da presente pesquisa, sobretudo com relação à simulação do balanço hídrico na bacia.

A fase terrestre do ciclo hidrológico é baseada na equação do balanço hídrico (Eq. 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_d - Q_{sup} - E_a - w_{vad} - Q_{sub}) \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo SW_t a quantidade final de água no solo (mm); SW_0 a quantidade inicial de água no solo (mm); t o tempo (dias); P_{d_i} a precipitação acumulada no dia i (mm); Q_{sup_i} representa o escoamento superficial acumulado no dia i (mm); E_{a_i} a quantidade de água que evapotranspirou

no dia i (mm); w_{vad_i} é a quantidade de percolação e de desvio de fluxo que sai do perfil do solo no dia i (mm); e Q_{sub_i} é a quantidade do fluxo de retorno no dia i (mm).

Para o cálculo da produção de sedimentos, é utilizada a Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE (Eq. 2) (NEITSCH et al., 2011):

$$sed = 11,8(Q_{sup} \cdot Q_{pico} \cdot area_{URH})^{0,56} \cdot K_{EUPS} \cdot C_{EUPS} \cdot LS_{EUPS} \cdot P_{EUPS} \cdot CFRG \quad (\text{Eq. 2})$$

no qual, sed é o aporte de sedimentos, após evento de precipitação do dia (ton); Q_{sup} é o escoamento superficial (mm/ha), Q_{pico} é a taxa de escoamento de pico (m³/s); $area_{URH}$ é a área da unidade de resposta hidrológica na qual é estimada o aporte de sedimentos (ha); K_{EUPS} é o fator de erodibilidade do solo (t h MJ-1 mm-1); C_{EUPS} é o fator de uso e manejo do solo; P_{EUPS} é o fator de práticas conservacionistas; LS_{EUPS} é o fator topográfico; e $CFRG$ é o fator de fragmentação esparsa.

Os cálculos de cada variável do balanço hídrico serão detalhados nos itens a seguir.

4.1.1.1 Escoamento superficial

O escoamento superficial ocorre quando a taxa de água aplicada à superfície do solo excede a taxa de infiltração. O modelo SWAT fornece dois métodos para o cálculo do escoamento superficial: o Método de Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) e o método de infiltração de Green e Ampt (1911), utilizado quando se possuem dados sub-diários de precipitação. Para este trabalho, foi adotado o método CN, devido a maior disponibilidade de dados de precipitação na forma diária.

O método CN, elaborado em 1954 pelo SCS dos Estados Unidos, atualmente *Natural Resource Conservation Service* (NRCS), foi desenvolvido para fornecer, de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (NEITSCH et al., 2011). O valor de CN está compreendido entre 0 e 100 (valor adimensional), correspondendo a zero para uma bacia de condutividade hidráulica infinita e 100 a uma bacia totalmente impermeável (BRIGHENTI, 2015). Este modelo é dado pela Eq. 3:

$$Q_{sup} = \frac{(P_d - I_a)^2}{(P_d - I_a + S)} \quad (\text{Eq. 3})$$

sendo, Q_{sup} é o escoamento superficial total (mm), P_d é a precipitação total (mm), I_a é a abstração inicial que abrange o armazenamento, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial (mm) e S é o parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro S varia espacialmente, considerando mudanças no tipo, uso e cobertura, manejo e declividade do solo, além das condições prévias de umidade (NEITSCH et al., 2011). Sua determinação considera o fator CN, e é dado pela seguinte equação (em unidades métricas):

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

onde CN é o valor da Curva Número para o dia.

O CN é função da permeabilidade, do uso e da condição inicial de umidade do solo. A abstração inicial (I_a) é considerada igual a $0,2S$, onde o escoamento só irá ocorrer se $P_d > I_a$. Desta forma, a Eq. 3 pode ser rescrita da seguinte forma (Eq. 5):

$$Q_{sup} = \frac{(P_d - 0,2S)^2}{(P_d + 0,8S)} \quad (\text{Eq. 5})$$

O valor do CN pode ser corrigido em função da umidade antecedente do solo, onde CN_I indica uma condição de seca, CN_{II} uma condição normal e CN_{III} uma condição úmida (NEITSCH et al., 2011). O cálculo das CN_{II} e CN_{III} se dá através das Equações 6 e 7.

$$CN_I = CN_{II} - \frac{20 \cdot (100 - CN_{II})}{(100 - CN_{II}) + \exp[2,533 - 0,0636 \cdot (100 - CN_{II})]} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$CN_{III} = CN_{II} \cdot \exp[0,00673 \cdot (100 - CN_{II})] \quad (\text{Eq. 7})$$

4.1.1.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o principal mecanismo pelo qual a água é removida de uma bacia. Inclui todos os processos pelos quais a água na superfície do solo é convertida em vapor de água, desde a evaporação a partir do dossel das plantas, a transpiração, a sublimação da neve, até a evaporação do solo (FERRIGO, 2014).

Evapotranspiração potencial

O modelo SWAT permite o cálculo da evapotranspiração potencial através dos métodos de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) ou Hargreaves (HARGREAVES e SAMANI, 1982). Para isso, o modelo requer dados médios climáticos mensais referentes ao período simulado, sendo possível, também, inserir diretamente os dados de evapotranspiração observados para o período simulado.

Para esta pesquisa, foi adotado o método de Penman-Monteith, recomendado por Smith (1991) e também adotado por Lelis (2011), Castro (2013) e Santos (2016). O método de Penman-Monteith é dado pela Eq. 8:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (\text{Eq. 8})$$

no qual λE é a densidade do fluxo de calor latente (MJ/m²/dia), E é a profundidade da taxa de evaporação (mm/dia), Δ é a inclinação da curva pressão-temperatura de saturação do vapor (KPa/°C), H_{net} é a radiação líquida (MJ/m²/dia), G representa a densidade de fluxo de calor para o solo (MJ/m²/dia), ρ_{air} é a densidade do ar (kg/m³), c_p é o calor específico (MJ/kg/°C), e_z^0 é a pressão de vapor de saturação do ar na altura z (kPa), e_z é a pressão de vapor de água do ar na altura z (kPa); γ é a constante psicrométrica (kPa/°C), r_c é a resistência do dossel da planta, e r_a é a resistência aerodinâmica.

Evapotranspiração real

Uma vez que a evapotranspiração potencial é determinada, busca-se a real através da demanda evaporativa da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, da transpiração dos vegetais e da evaporação do solo (CARVALHO NETO, 2011).

Com relação à interceptação, a quantidade máxima de água que pode ser armazenada nas copas é calculada em função do índice de área foliar, de acordo com a Eq. 9. Quando a precipitação acontece em um determinado dia, o armazenamento do dossel é preenchido antes da água chegar ao solo (SANTOS, 2016).

$$can_{dia} = Canmx \cdot \frac{IAF}{IAF_{max}} \quad (\text{Eq. 9})$$

no qual can_{dia} é a quantidade máxima de água que é interceptada e armazenada no dossel em um determinado dia (mm), $Canmx$ é a quantidade máxima de água que pode ser interceptada

e armazenada no dossel quando este está totalmente desenvolvido (mm), IAF é o índice de área foliar para um determinado dia, e IAF_{max} é o índice de área foliar máximo para a planta.

A água armazenada no dossel das plantas fica, então, disponível para ser evapotranspirada. Santos (2016) destaca que o SWAT remove o máximo de água possível do armazenamento dossel ao calcular a evaporação real. O modelo considera que o volume interceptado está disponível para evapotranspiração sob as seguintes condições: (com todas as variáveis em mm):

- Se a evapotranspiração potencial (E_0) for menor que a quantidade de água interceptada no dossel (R_{int}), então a quantidade de água interceptada no dia ($R_{int(f)}$) será o resultado da subtração da quantidade de água interceptada no início do intervalo de tempo ($R_{int(i)}$), pela evapotranspiração potencial (ou diretamente pela evaporação da quantidade de água livre existente no dossel da planta em um determinado dia (E_{can}))) (Eq. 10):

$$E_a = R_{can} = E_0 \rightarrow R_{int(f)} = R_{int(i)} - E_{can} \quad (\text{Eq. 10})$$

E_a é a evapotranspiração real na bacia em um determinado dia (mm).

- No caso da evapotranspiração potencial ser superior à quantidade de água armazenada na copa das árvores, então, toda a lâmina interceptada será evaporada (Eq. 11):

$$E_{can} = R_{int(i)} \rightarrow R_{int(f)} = 0 \quad (\text{Eq. 11})$$

Quando a equação de Penman-Monteith é selecionada como método de evapotranspiração potencial, como foi o caso deste estudo, a transpiração é calculada com base nas equações utilizadas pelo método Penman-Monteith (NEITSCH et al., 2011).

Com relação à evaporação do solo, esta é estimada mediante uma função exponencial, de acordo com a profundidade do solo e a quantidade de água existente. Quando existe uma demanda de evaporação da água do solo, o SWAT primeiro particiona a demanda evaporativa entre as diferentes camadas (FERRIGO, 2014). A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água a ser evaporada é dada pela Equação 12:

$$E_{solo,z} = E_z \times \frac{z}{(z + \exp(2,374 - 0,00713 \times z))} \quad (\text{Eq. 12})$$

sendo $E_{solo,z}$ a demanda evaporativa (mm) na profundidade z , E_z'' a evaporação máxima do solo para o dia (mm) e z a profundidade do solo (mm).

A quantidade de demanda evaporativa para uma camada de solo é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas calculadas nos limites superior e inferior da camada do solo (Eq. 13):

$$E_{solo,ly} = E_{solo,zl} - E_{solo,zu} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde, $E_{solo,ly}$ é a demanda evaporativa para a camada ly (mm), $E_{solo,zl}$ é a demanda evaporativa do limite inferior da camada do solo, e $E_{solo,zu}$ é a demanda evaporativa do limite superior da camada do solo.

Um coeficiente foi incorporado na Eq. 12 para permitir que o usuário modifique a distribuição da profundidade utilizada para atender a demanda evaporativa do solo, resultando na Eq. 14:

$$E_{solo,ly} = E_{solo,zl} - E_{solo,zu} \times esco \quad (\text{Eq. 14})$$

onde $esco$ é o coeficiente de compensação da evaporação do solo. Quanto menor for o valor de $esco$ significa que o modelo é capaz de extraír mais água pela demanda evaporativa a partir de camadas mais baixas, como pode ser observado na Figura 12.

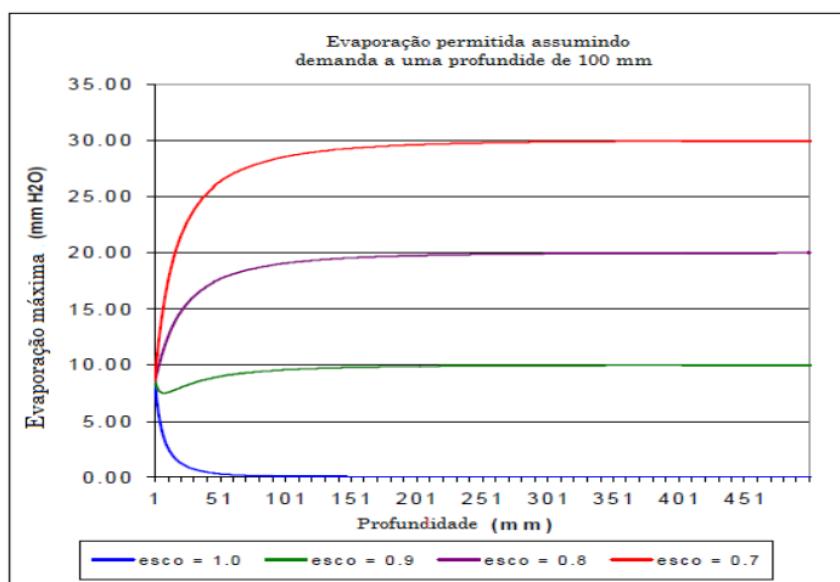


Figura 12 – Distribuição da demanda evaporativa do solo em profundidade. Fonte: Neitsch et al. (2005).

4.1.1.3 Percolação

A percolação é a transferência de água do solo para o reservatório de água subterrânea. Ocorre quando a quantidade de água excede a capacidade de campo de uma camada do solo e a camada imediatamente inferior não está saturada. O processo combina duas condições: a primeira através da propagação do armazenamento e a segunda pelo fluxo por fendas existentes no solo (SANTOS, 2016). O volume de água disponível na camada do solo para a percolação é calculado pelas Eqs. 15 e 16:

$$SW_{cam,excesso} = SW_{cam} = FC_{cam} \text{ se } SW_{cam} > FC_{cam} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$SW_{cam,excesso} = 0 \text{ se } SW_{cam} \leq FC_{cam} \quad (\text{Eq. 16})$$

sendo $SW_{cam,excesso}$ a quantidade de água disponível para percolar no dia (mm), SW_{cam} é a quantidade diária de água em uma determinada camada do solo (mm) e FC_{cam} é a quantidade de água na capacidade de campo (mm).

A quantidade de água que efetivamente se moverá para a camada de solo inferior é calculada pela Equação 17:

$$w_{perc,cam} = SW_{cam,excesso} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta T}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (\text{Eq. 17})$$

no qual $w_{perc,cam}$ é a quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm); ΔT é a duração do intervalo de tempo (h); e TT_{perc} é o tempo de percolação entre as camadas (h).

O tempo de percolação entre as camadas é dado pela Equação 18:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{cam} - FC_{cam}}{K_{sat}} \quad (\text{Eq. 18})$$

onde, SAT_{cam} é a quantidade de água no solo completamente saturado (mm) e K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm/h).

A água que percola abaixo da última camada do solo entra na zona vadosa, para só depois adentrar no aquífero subterrâneo.

O fluxo lateral é calculado através de um modelo de armazenamento cinético, desenvolvido por Sloan et al. (1983), e que se baseia na equação de continuidade de massa (Equação 19):

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2 \cdot SW_{cam,excesso} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\Phi_d \cdot L_{slp}} \right) \quad (\text{Eq. 19})$$

onde Q_{lat} é o escoamento lateral (mm/dia), slp é a declividade da encosta (m/m); Φ_d é a porosidade drenável do solo (mm/mm); e L_{slp} o comprimento da encosta (m).

4.1.1.4 Água subterrânea

O volume de água que percola tende a recarregar os aquíferos, o raso e o profundo, caso não ascenda através das franjas capilares (SANTOS, 2016). A quantidade de água que pode recarregar ambos aquíferos é dada pela Equação 20:

$$W_{rec} = \left(1 - \exp \left[\frac{-1}{\delta_{aq}} \right] \right) W_{seep} + \exp \left[\frac{-1}{\delta_{aq}} \right] W_{rec,i-1} \quad (\text{Eq. 20})$$

onde W_{rec} é a quantidade de água que adentra os aquíferos no dia i (mm); δ_{aq} é o tempo de drenagem sob as camadas de solo (dia); W_{seep} é a quantidade de água que percolou através da última camada de solo (mm); e $W_{rec,i-1}$ é a quantidade de água que entra no aquífero no dia $i - 1$ (mm).

Com isto, o modelo regula a quantidade de água que recarrega o aquífero profundo (W_{prf}) pelo uso da Equação 21:

$$W_{prf} = \beta_{prf} \cdot W_{rec} \quad (\text{Eq. 21})$$

onde β_{prf} é o coeficiente de percolação do aquífero.

Desta forma, a quantidade de água destinada ao aquífero raso ($W_{rec,rs}$) é dado pela Eq. 22:

$$W_{rec,rs} = W_{rec} + W_{prf} \quad (\text{Eq. 22})$$

Por fim, o balanço hídrico no aquífero raso é dado pela Eq. 23:

$$aq_{rs,i} = aq_{rz,i-1} + W_{rec,rs} - Q_{aq} - W_{revap} - W_{bomba,rs} \quad (\text{Eq. 23})$$

onde $aq_{rs,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia (mm); $aq_{rz,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm); Q_{aq} é o escoamento subterrâneo que recarrega o canal principal (fluxo de base) (mm); W_{revap} é a quantidade de água que ascende por franjas capilares (mm); e $W_{bomba,rs}$ é a quantidade de água retirada através de bombas (mm).

Para considerar o volume de água que ascende através de franjas capilares, em função da demanda de evapotranspiração, o modelo SWAT incorpora o processo denominado por “*Revap*” (W_{revap}). Este processo não é contabilizado no volume evapotranspirado, sendo de fundamental importância em bacias hidrográficas onde a zona saturada encontra-se próxima a superfície e há raízes profundas (CARVALHO NETO, 2011). A máxima quantidade de água que poderá ser retirada via *Revap* é dada pela Equação 24:

$$W_{revap,max} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (\text{Eq. 24})$$

onde $W_{revap,max}$ é a máxima quantidade de água (mm) que ascende em resposta ao déficit hídrico, β_{rev} é o coeficiente de *Revap* e E_0 é o potencial de evapotranspiração (mm) daquele dia.

A quantidade de água que efetivamente passa por tal processo é determinada pelas seguintes condições:

$$W_{revap} = 0 \text{ se } aq_{rs} \leq aq_{lim,rv} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$W_{revap} = W_{revap,max} - aq_{lim,rv} \text{ se } aq_{lim,rv} < aq_{rs} < (aq_{lim,rv} + W_{revap,max}) \quad (\text{Eq. 26})$$

$$W_{revap} = W_{revap,max} \text{ se } aq_{lim,rv} \geq (aq_{lim,rv} + W_{revap,max}) \quad (\text{Eq. 27})$$

onde aq_{rs} é a quantidade de água armazenada no aquífero raso (mm) e $aq_{lim,rv}$ é o valor limite do nível de água a ser superado para ocorrer o processo *Revap* (mm).

4.1.2 Dados de entrada do modelo SWAT

Para a realização das simulações com o modelo SWAT, foi necessária a inserção de uma série dados de entrada, para a calibração da variável hidrológica vazão. Portanto, foram necessários dados meteorológicos, pluviométricos, mapa de uso e ocupação do solo, modelo digital de elevação e mapa de tipos de solo para compor o banco de dados do modelo e, ainda, dados observados da variável hidrológica estudada (vazão).

O período selecionado para a calibração do modelo foi de 1970 a 1990 para o posto Poço de Pedras e de 1973 a 1990 para o posto Caraúbas; para a validação foi de 1994 a 2014 para ambos os postos. Esses períodos foram definidos em razão da maior disponibilidade de séries diárias de precipitação mais consistentes, com menor número de falhas. Dessa maneira, os dados climáticos e hidrológicos foram adquiridos para os mesmos períodos de calibração e validação. No tocante ao mapa de uso do solo, esse foi obtido com o objetivo de representar a realidade do período de calibração do modelo, sendo também utilizado para o período de validação. A seguir serão apresentados a forma de construção do banco de dados do SWAT e os dados utilizados na modelagem.

4.1.2.1 Dados hidroclimáticos e estações de monitoramento

O SWAT necessita de dados diários referentes às condições climáticas da área de estudo. Infelizmente para a área de estudo, somente a série diária de precipitação foi possível de ser obtida, tendo em vista que as demais variáveis climáticas, como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar, apresentavam muitas falhas. Neste caso, para suprir esta necessidade, foi utilizado como alternativa o gerador climático disponível no modelo, que é capaz de estimar valores diários através de médias mensais das variáveis climáticas citadas indisponíveis para a área de estudo. São necessários ainda dados observados da variável hidrológica a qual se está estudando, para verificar o desempenho do modelo, no caso deste trabalho, a vazão.

Os dados de precipitação na escala diária foram obtidos junto à ANA (2016) e ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2016). Com relação aos dados fluviométricos, estes foram obtidos em escala diária, junto à ANA (2016) e, em seguida, foram organizados na escala mensal para a calibração do modelo. Essa escala temporal foi selecionada para a calibração do modelo, devido ao fato das fontes de erros da modelagem, sejam pelas falhas presentes nos dados de entrada, sejam pelas associações realizadas na parametrização do

modelo, quando se associam os dados de entrada, por exemplo dados de uso e ocupação do solo, aos dados existentes no banco de dados do modelo.

Nesta pesquisa, fez-se uso de dados de 21 postos pluviométricos e dois postos fluviométricos (Tabela 3). A Figura 13 ilustra a localização dos postos de monitoramento utilizados no presente estudo. Com relação aos dados diários de precipitação, em todos os postos coletados foram encontradas falhas. Dessa forma, foi utilizado o método da ponderação regional para preencher as falhas de um posto com base nos dados de postos vizinhos, com características climáticas semelhantes ao posto que se deseja preencher e com no mínimo dez anos de série de dados (SILVA et al., 2010). Assim, a falha (P_x) é preenchida por:

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{M_x}{M_a} P_a + \frac{M_x}{M_b} P_b + \frac{M_x}{M_c} P_c \right) \quad (28)$$

sendo M_x a média aritmética do posto com falha; M_a , M_b e M_c a média aritmética dos postos vizinhos; e P_a , P_b e P_c o valor da precipitação dos postos vizinhos para a mesma data do posto com falha.

Tabela 3 – Descrição dos postos pluviométricos e fluviométricos utilizados no estudo.

Nome do Posto	Tipo	Entidade Responsável	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Dias com Falhas
Barra de São Miguel	Pluviométrico	AESA	736025	-7,45	-36,20	31
Boqueirão	Pluviométrico	SUDENE	736023	-7,29	-36,07	1826
Cabaceiras	Pluviométrico	AESA	736022	-7,36	-36,17	117
Camalau	Pluviométrico	AESA	736021	-7,55	-36,52	61
Caraubas	Pluviométrico	AESA	736020	-7,43	-36,31	396
Congo	Pluviométrico	SUDENE	736018	-7,48	-36,40	672
Coxixola	Pluviométrico	AESA	736017	-7,37	-36,37	203
Fazenda Bananeiras	Pluviométrico	AESA	736026	-7,31	-36,58	366
Prata	Pluviométrico	AESA	737004	-7,41	-37,06	61
São Sebastião do Umbuzeiro	Pluviométrico	AESA	837000	-8,09	-37,01	399
Santa Maria da Paraíba	Pluviométrico	AESA	836001	-8,02	-36,41	2031
Sumé	Pluviométrico	DNOCS	736003	-7,39	-36,56	4066
Monteiro	Pluviométrico	INMET	82792	-7,89	-37,12	714
Desterro	Pluviométrico	DNOCS	737018	-7,17	-37,06	588
Gurjão	Pluviométrico	SUDENE	736016	-7,16	-36,29	518
Juazeirinho	Pluviométrico	SUDENE	736016	-7,04	-36,35	366
Pocinhos	Pluviométrico	DNOCS	736014	-7,04	-36,04	396
São José dos Cordeiros	Pluviométrico	SUDENE	736011	-7,23	-36,49	242
Serra Branca	Pluviométrico	SUDENE	736009	-7,29	-36,40	214

Nome do Posto	Tipo	Entidade Responsável	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Dias com Falha s
Soledade	Pluviométrico	DNOCS	736008	-7,04	-36,22	307
Taperoá	Pluviométrico	DNOCS	736002	-7,12	-36,50	2164
Poço de Pedras	Fluviométrico	AESA	38850000	-7,39	-36,43	4833
Caraúbas	Fluviométrico	AESA	38830000	-7,73	-36,50	364

Fonte: ANA (2016) e INMET (2016).

Notas:

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba; SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste; DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas; INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

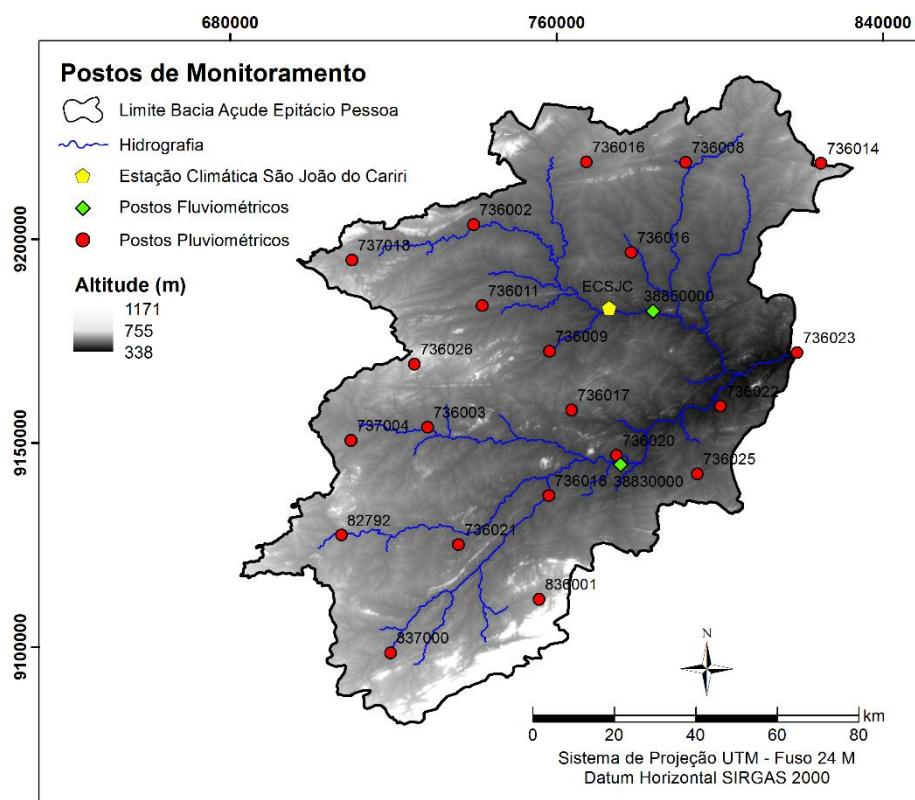


Figura 13 – Localização dos postos de monitoramento utilizados do estudo.

Os parâmetros necessários para alimentar o gerador climático do modelo SWAT são valores relacionados à temperatura, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar (Tabela 4). Com relação a esses parâmetros, foram utilizadas as informações obtidas em Carvalho Neto (2011) (Tabela 5), que realizou a coleta de dados com base na estação climática localizada na coordenada 7°38'0"S e 36°52'0"W, mais especificamente dentro da Bacia Experimental de São João do Cariri – PB, inserida dentro da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

Tabela 4 – Descrição dos parâmetros do gerador climático do SWAT.

Variável	Parâmetro	Descrição	Unidade
Temperatura	TMPMX	Média das temperaturas máximas diárias a cada mês	°C
	TMPMN	Média das temperaturas mínimas diárias a cada mês	°C
	TMPSTDMX	Desvio padrão das temperaturas máximas diárias a cada mês	°C
Precipitação	TMPSTDMN	Desvio padrão das temperaturas mínimas diárias a cada mês	°C
	PCPMM	Média da precipitação total mensal para o período	mm
	PCPSTD	Desvio padrão das precipitações a cada mês	mm/dia
	PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação diária a cada mês	adm
	PR_W1	Probabilidade de acontecer um dia úmido após um dia seco no mês	adm
	PR_W2	Probabilidade de um dia úmido acontecer após um dia úmido no mês	adm
Radiação Solar	PCPD	Média de dias com precipitação no mês	dias
	RAINHHMX	Precipitação máxima para meia hora de chuva em todo o período de registro para o mês	mm
Velocidade do Vento	SOLARAV	Média da radiação solar diária para cada mês	MJ m ² /dia
Umidade Relativa do Ar	WNDAV	Média das velocidades diárias de vento para cada mês	m/s
	DEWPT	Média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês	°C

Tabela 5 – Valores das médias mensais para os parâmetros climatológicos utilizados no gerador climático do SWAT.

Parâmetro/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	32,8	33,2	32,8	31,8	30,6	29,8	28,9	29,5	31,0	32,2	32,5	32,1
TMPMN	21,0	20,9	20,9	20,7	20,3	18,8	17,9	17,9	19,1	19,6	20,1	20,2
TMPSTDMX	3,4	3,7	3,3	3,0	3,4	3,3	3,2	3,4	3,4	3,3	3,5	4,6
TMPSTDMN	1,1	1,8	1,3	1,3	1,4	1,3	1,9	1,3	2,3	1,1	1,1	2,0
PCPMM	60,0	58,1	70,1	64,7	39,4	33,6	26,0	19,3	7,3	4,2	6,3	33,0
PCPSTD	9,2	8,5	7,9	9,2	5,0	3,9	2,7	2,1	1,5	1,8	3,0	6,8
PCPSKW	6,6	5,9	5,2	8,3	7,6	7,3	5,0	4,5	9,6	21,7	21,4	9,2
PR_W1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
PR_W2	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4
PCPD	4,5	5,2	7,3	8,0	7,0	8,9	8,8	6,1	2,5	1,0	1,6	2,6
RAINHHMX	30,5	25,5	26,6	42,2	21,0	18,7	7,7	5,5	1,6	2,3	0,5	7,3
SOLARAV	39,5	35,9	38,6	36,5	32,5	29,0	31,1	35,0	39,8	42,4	41,7	40,7
WNDAV	2,3	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6	1,8	2,1	2,5	2,8	2,8	2,4
DEWPT	20,1	20,1	20,2	20,0	20,0	16,7	18,3	18,0	18,4	18,7	19,4	19,4

Fonte: Carvalho Neto (2011).

4.1.2.2 Material cartográfico

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é o primeiro dado a ser inserido na interface ArcSWAT. Com base nesse produto são geradas as direções de fluxo, bem como a delimitação da bacia e das sub-bacias hidrográficas. O MDE utilizado neste estudo foi adquirido no portal do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no endereço <http://www.dsr.inpe.br/topodata>, com resolução espacial de 30 m (Figura 10). Observa-se que essa bacia possui altitude variando entre 338 e 1171 m, onde as regiões de maior altitude localizam-se na parte sul da bacia.

Após o processamento do MDE, inicia-se o processo de geração das URHs. Para tanto, são necessários mapas de tipos de solo, uso e ocupação do solo e o próprio MDE, de onde são obtidas as classes de declividade. As URHs constituem áreas homogêneas com relação ao tipo de solo, uso do solo e declividade.

O mapa de uso e ocupação do solo da região (Figura 14) foi gerado a partir de um mosaico de três imagens adquiridas junto ao INPE, cujas descrições podem ser vistas na Tabela 6. Estas imagens foram adquiridas por estarem dentro do período de calibração do modelo e, também, devido à ausência de nuvens, favorecendo o processo de classificação das imagens.

Tabela 6 – Descrição das imagens utilizadas na classificação do uso e ocupação do solo.

Data da Imagem	Satélite	Sensor	Órbita	Ponto	Bandas	Resolução Espacial
02/08/1980	LANDSAT 2	MSS	230	65	4-6-5 (RGB)	80 m
09/10/1981	LANDSAT 2	MSS	231	65	4-6-5 (RGB)	80 m
21/08/1980	LANDSAT 2	MSS	231	66	4-6-5 (RGB)	80 m

Fonte: INPE (2016)

Para a classificação das imagens foi utilizado o método não-supervisionado, utilizando-se a ferramenta *Isocluster*, onde foram identificadas cinco classes. Em seguida, finalizou-se a classificação com a ferramenta *Maximum Likelihood Classification*. O método não-supervisionado foi adotado devido à extensão territorial da bacia hidrográfica, à dificuldade na interpretação da vegetação do tipo caatinga e à resolução espacial das imagens, que não permitiram uma visualização mais precisa da área de estudo. A descrição da distribuição do uso e ocupação do solo encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Distribuição do Uso do Solo na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

Uso do Solo	Área (km ²)	Área (%)
Vegetação herbácea	2.588,10	20,86
Vegetação arbustiva	4.361,02	35,15
Solo exposto	1.794,57	14,47
Vegetação arbórea	3.589,67	28,93
Água	72,85	0,59
TOTAL	12.406,21	100,00

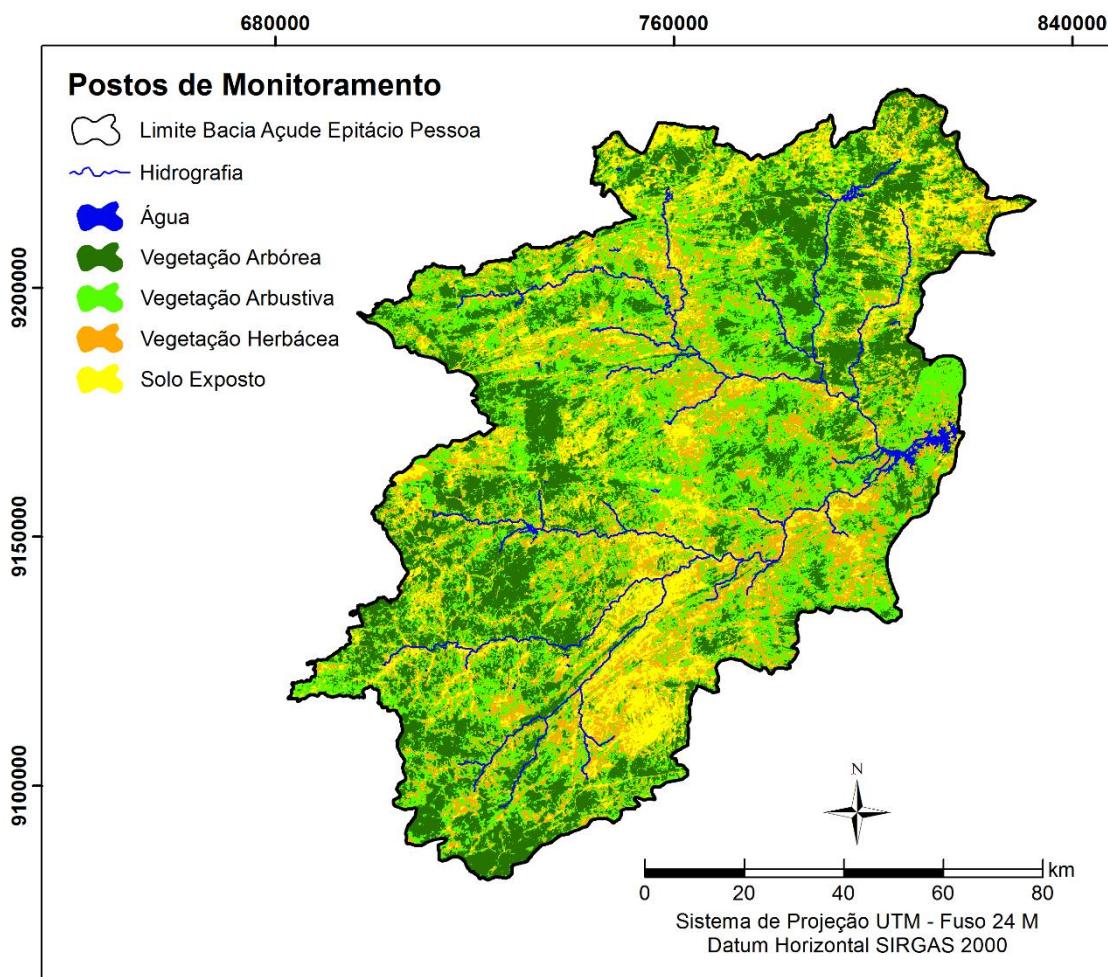


Figura 14 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

O modelo SWAT possui um banco de dados com diversos parâmetros para cada tipo de uso e ocupação do solo. Para que fossem realizadas as simulações, foi necessário efetuar associações/adaptações entre os usos do solo do banco de dados do SWAT e os existentes na bacia. Para essas associações foram levadas em consideração as características, sobretudo, com relação ao porte da vegetação. Essas associações podem ser vistas na Tabela 8.

Tabela 8 – Associação entre as classes de uso do solo existentes na bacia do Açude Epitácio Pessoa com as existentes no banco de dados do modelo SWAT.

Classe de uso de solo na bacia	Classe de uso de solo no SWAT
Água	<i>Water – WATR</i>
Vegetação arbórea	<i>Range brush – RNGB</i>
Vegetação arbustiva	<i>Range grasses – RNGE</i>
Vegetação herbácea	<i>Southwestern US (Arid) Range – SWRN</i>
Solo exposto	<i>Barren – BARR</i>

O mapa de tipos de solo (Figura 15) foi elaborado com base no Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH, da AESA. A distribuição dos solos na área de estudo pode ser observada na Tabela 9, com a descrição completa dos solos disposta no Apêndice A.

Tabela 9 – Distribuição dos tipos de solo na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

Tipo de Solo	Área (km ²)	Área (%)
Luvissolo	4411,95	35,56
Neossolo Flúvico	524,23	4,23
Neossolo Litólico	4534,65	36,55
Cambissolo	84,03	0,68
Latossolo	0,33	0,00
Planossolo	984,49	7,94
Neossolo Regolítico	937,82	7,56
Vertissolo	855,11	6,89
Argissolo	73,59	0,59
TOTAL	12406,21	100,00

Fonte: AESA (2017).

Os valores dos parâmetros para os tipos de solos existentes na bacia foram definidos com base no Sistema de Informação de Solos Brasileiros (EMBRAPA, 2015) e com base em Rawls et al. (1982), Salter e Williams (1967; 1969), Saxton e Rawls (2006), Tsvetsinskaya et al. (2002), Williams (1975), Paes et al. (2013) e Machado et al. (2006), conforme será mostrado mais adiante. Estes parâmetros compreendem as propriedades físico-hídricas existentes no solo, como, por exemplo, a profundidade da raiz (SOL_ZMX) e dos horizontes (SOL_Z), o grupo hidrológico ao qual o solo pertence (HYDGRP), as porcentagens das partículas que compõem o solo (areia, silte, argila e cascalho), entre outros parâmetros.

A Tabela 10 mostra as informações dos perfis de solo usados neste estudo e os municípios onde se encontram os pontos de amostragem podem ser observados na Figura 16.

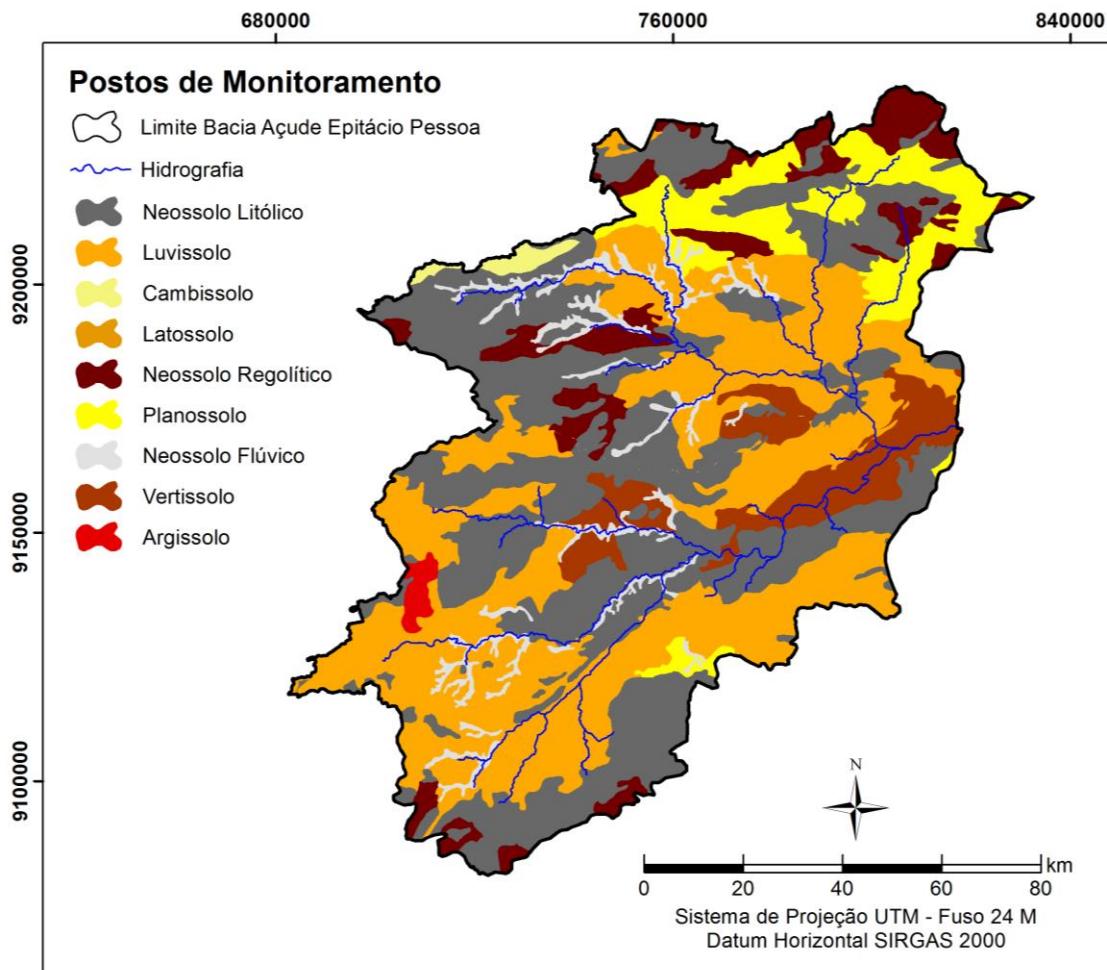


Figura 15 – Mapa de tipos de solo da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

Tabela 10 – Descrição dos perfis utilizados na modelagem.

Nova classificação	Classificação Antiga	Código do ponto de amostragem (PA)	Município
Cambissolo	Cambissolo	7821	Taperoá
Latossolo	Latossolo	7593	Cuité
Luvissolo	Bruno não cárlico	7761	Monteiro
Neossolo Flúvico	Solo Aluvial	5684	Patos
Neossolo Litólico	Solo Litólico	7873	Seridó
Neossolo Regolítico	Regossolo	7878	Livramento
Planossolo	Planossolo	7839	Cubati
Vertissolo	Vertissolo	7835	Sumé
Argissolo	Podzólico	5646	Patos

Fonte: EMBRAPA (2015).

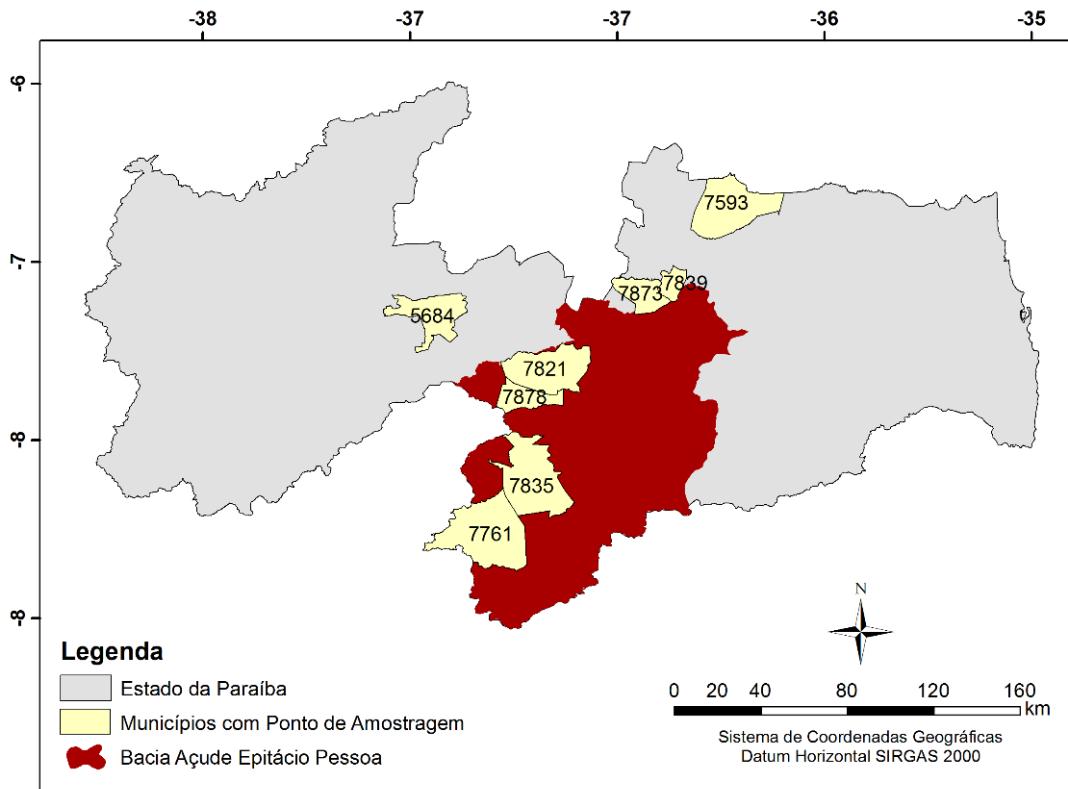


Figura 16 – Municípios com ponto de amostragem dos perfis de solo utilizados na modelagem.

Com base nos dados obtidos da EMBRAPA (2015), foi possível organizar os parâmetros do solo relativos à profundidade dos horizontes (SOL_Z), ao número de horizontes do solo (NLAYERS), às porcentagens de areia (SAND), silte (SILT), argila (CLAY), cascalho (ROCK) e carbono orgânico (CBN) e à profundidade máxima da raiz (SOL_ZMX), que foi adotada como sendo o valor da profundidade do último horizonte do solo, tendo em vista que na área de estudo os solos são rasos e a vegetação é adaptada a esta característica.

O grupo hidrológico (HYDGRP) corresponde à classe à qual o solo pertence, de acordo com NRCS (2009), a partir do valor de condutividade hidráulica (mm/h) que ele possui, podendo aumentar ou diminuir as taxas de infiltração no solo dependendo do valor. Nessa classificação, os solos são organizados em quatro classes distintas: A, B, C e D.

A determinação da condutividade hidráulica (SOL_K), utilizada para classificar o grupo hidrológico de cada solo, bem como da porosidade (ANION_EXCL), foram baseadas na proposta de Rawls et al. (1982), que fizeram uma estimativa de algumas propriedades do solo, com base na textura a partir de experimentos de campo realizados nos Estados Unidos. Já para a obtenção dos valores da capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC) utilizaram-se os valores recomendados por Salter e Williams (1967; 1969), que estimaram a capacidade de água

disponível com base nas características de textura do solo, também com base em experimentos realizados nos Estados Unidos.

Para a determinação da densidade aparente do solo (SOL_BD) utilizou-se o *software Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator*, desenvolvido por Saxton e Rawls (2006). Esse programa computacional é utilizado para estimar a densidade aparente do solo mediante informações sobre a textura do solo, salinidade, compactação, teor de matéria orgânica e presença de cascalho no solo (Figura 17).

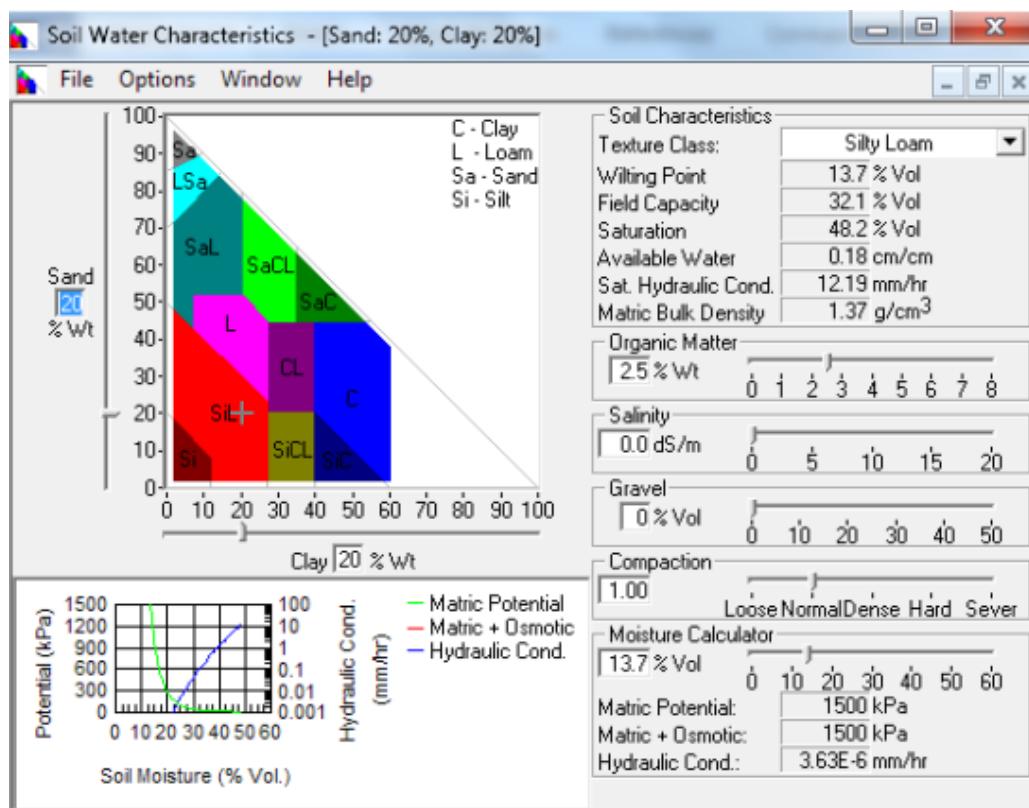


Figura 17 – Vista do *software Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator*.

Os valores de albedo (SOL_ALB) pautaram-se no estudo de Tsvetsinskaya et al. (2002), que calcularam esse parâmetro, conforme a classificação da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO, para diferentes tipos de solos no Norte da África e na Península Arábica, com base em imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS.

O fator de erodibilidade (USLE_K) (Eq. 29), que significa a capacidade de resistência de um solo aos impactos das gotas de chuva, foi adquirido por meio da equação proposta por Williams (1975), em que o fator de erodibilidade é calculado para cada horizonte do solo com base nas porcentagens de areia, silte e argila e na presença de carbono orgânico.

$$USLE_K = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgC} \cdot f_{hisand} \quad (\text{Eq. 29})$$

sendo, f_{csand} o fator que representa o conteúdo de areia grossa; f_{cl-si} a fração do solo que contém argila e silte; f_{orgC} a estimativa da contribuição do carbono orgânico; e f_{hisand} o fator que representa o conteúdo de areia fina.

Cada um desses fatores é calculado separadamente por:

$$f_{csand} = \left\{ 0,2 + 0,3 \exp \left[-0,256 \cdot ms \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \quad (\text{Eq. 30})$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_{silt} + m_c} \right)^{0,3} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$f_{orgC} = 1 - \frac{0,25 \cdot orgC}{orgC + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC)} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$f_{hisand} = 1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \quad (\text{Eq. 33})$$

onde m_s é a fração de areia (diâmetros de 0,05 – 2 mm); m_{silt} é a fração de silte (diâmetros de 0,002 – 0,05 mm); m_c é a fração de argila (diâmetros < 0,002 mm); e $orgC$ é o percentual de carbono orgânico na camada do solo.

Os valores de condutividade elétrica (SOL_EC) foram obtidos a partir dos trabalhos de Paes et al. (2013) para os tipos de solo Cambissolo, Luvissolo, Neossolo Flúvico, Planossolo e Vertissolo; Nascimento Silva et al. (2014) para o tipo de solo Neossolo Litólico; Lima et al. (2013) para o tipo de solo Neossolo Regolítico e Machado et al. (2006) para o tipo de solo Latossolo. Quanto ao tipo de solo Argissolo, este foi obtido com base no trabalho de Silva et al. (2012).

Dessa forma, de posse das informações destacadas anteriormente, foi possível construir o banco de dados de entrada referente aos tipos de solo na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. Ressalta-se que o parâmetro de fração de fissuras no solo (SOL_CRK) não foi encontrado na literatura para os tipos de solos presentes na bacia, assim, optou-se por utilizar o valor padrão do banco de dados do SWAT (0,5). Todos os valores referentes aos parâmetros de solo usados na modelagem estão dispostos no Apêndice A.

4.2 SWAT-CUP

O SWAT-CUP é um programa disponível para auxiliar a calibração, validação e análises de incerteza dos projetos gerados no SWAT. Trata-se de um programa de domínio público, desenvolvido por Abbaspour et al. (2007). Devido ao fato do SWAT ser um modelo capaz de simular vários processos, este possui um elevado número de parâmetros que influenciam na calibração. Desta maneira, faz-se necessário que ajustes sejam realizados nos parâmetros durante o processo de calibração.

Nesse sentido, os parâmetros podem ser ajustados de forma manual ou automatizada. A calibração manual demanda muito tempo e grande conhecimento dos processos físicos e das equações do modelo, tendo em vista que as possibilidades de combinações entre os parâmetros são inúmeras. A calibração automática dos parâmetros do modelo permite a alteração sistemática e contínua dos mesmos, comparando a resposta entre os dados simulados e os observados. Neste estudo, foi utilizada a calibração automatizada mediante a ferramenta SWAT-CUP 2012 v. 5.1.6.2 (ABBASPOUR et al., 2007).

Para o ajuste automatizado da calibração, o SWAT-CUP possui cinco algoritmos: *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2) (ABBASPOUR et al., 2007); *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) (BEVEN E BINLEY, 1992); *Parameter Solution* (ParaSol) (VAN GRIENSVEN et al., 2006); *Mark chain Monte Carlo* (MCMC) (KUCZERA et al., 1998); e *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY E EBERHART, 1995).

Para este estudo, foi utilizado o algoritmo SUFI-2, que tem sido bastante difundido entre os utilizadores do SWAT (ABBASOUR et al., 2007; ROUHOLAHNEJAD et al., 2012; QIAO et al., 2013; BRIGHENTI et al., 2016; SALIMI et al., 2016). A descrição completa do algoritmo SUFI-2 pode ser encontrada em Abbaspour (2012), Ferrigo (2014) e Santos (2016). A seguir será apresentada uma descrição simplificada do SUFI-2.

4.2.1 SUFI-2

No SUFI-2, as incertezas dos parâmetros de entrada são representadas como distribuições uniformes, enquanto que as incertezas de saída do modelo, *P-factor*, são quantificadas pela previsão de incerteza de 95% (95PPU) calculada nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa das variáveis de saída obtida pela amostragem de hipercubo latino (MCKAY et al., 1979) não permitindo que 5% das simulações sejam ruins (ABBASPOUR et al., 2012). A amostragem de hipercubo latino é usada para desenhar conjuntos de parâmetros

independentes (YANG et al., 2008). Outra medida que busca quantificar a eficácia de uma análise de calibração e incerteza é o *R-factor*, que é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos.

De acordo com Abbaspour et al. (2007), o conceito por trás da análise de incerteza do algoritmo SUFI-2 é representado graficamente na Figura 18, onde se pode observar que um único valor de parâmetro (mostrado por um ponto) gera uma única resposta do modelo (Figura 18a). Enquanto a propagação da incerteza em um parâmetro (mostrado por uma linha) leva ao 95PPU ilustrado pela região sombreada na Figura 18b. Por fim, à medida que a incerteza de parâmetro aumenta (Figura 18c), a incerteza de saída também aumenta.

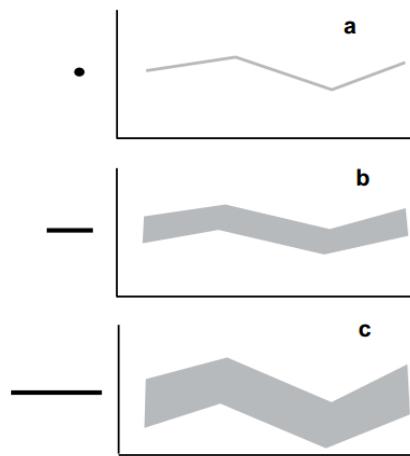


Figura 18 – Ilustração conceitual da relação entre incerteza de parâmetro e previsão de incerteza. Fonte: Abbaspour et al. (2007).

A confiabilidade do ajuste e do grau de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliados pelo *P-factor* e *R-factor*. O valor do *P-factor* varia entre 0 e 100%, enquanto que o *R-factor* varia entre 0 e infinito. O *P-factor* de 100% e o *R-factor* de 0 indicam uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos. Além disso, o desempenho do modelo pode ser quantificado pelo coeficiente de determinação (R^2) e/ou coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), entre os valores observados e os valores simulados no final da melhor simulação.

Para a utilização do SUFI2, algumas definições básicas, por parte do usuário, são necessárias, como: (a) escolha dos parâmetros que serão otimizados; (b) o estabelecimento de faixas mínimas e máximas fisicamente significativas para os parâmetros selecionados, bem como a relação matemática que deve ser adotada para a variação dos valores dos parâmetros; (c) o número de iterações que devem ser realizadas, sendo recomendado por Abbaspour et al. (2007) entre 500 e 1000 iterações; (d) as variáveis a serem verificadas (vazão, por exemplo),

incluindo a série histórica a ser considerada; (e) a função objetivo a ser utilizada como referência (NSE, por exemplo).

Durante a execução do SWAT-CUP, a amostragem do hipercubo latino é realizada, levando a n combinações de parâmetros, sendo n o número de iterações desejadas. O programa é executado n vezes e as variáveis de saída simuladas, correspondentes às variáveis observadas, são guardadas. A sensibilidade dos parâmetros é computada por meio do cálculo de um sistema de regressão múltipla, que retorna os parâmetros gerados pelo hipercubo latino *versus* os valores da função objetivo selecionada pelo usuário.

Um *t-test* é então usado para identificar a significância relativa de cada parâmetro e a sensibilidade é estimada pelas mudanças médias na função objetivo, resultante das alterações em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados (SANTOS, 2016).

O SWAT-CUP apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: (a) o *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor mais sensível é o parâmetro; e (b) o *p-value* que determina a significância da sensibilidade, em que um valor próximo à zero indica maior significância.

A descrição completa do SUFI-2 pode ser encontrada em Abbaspour (2012). Resumidamente, o processo de calibração utilizando o SUFI-2 consiste em três passos, conforme será descrito abaixo:

Passo 1: definição dos limites máximos e mínimos para cada parâmetro a ser calibrado, assume-se então que todos os parâmetros são distribuídos uniformemente dentro da região delimitada pelos valores mínimos e máximos, por meio da amostragem hipercubo latino

Passo 2: definição da função objetivo, a qual é condição para a decisão dos parâmetros finais na simulação.

Passo 3: cálculo da sensibilidade dos parâmetros em relação a cada iteração e em seguida, realização do *t-test* para ranquear a significância de cada parâmetro.

4.2.2 Seleção dos parâmetros para a calibração e análise de sensibilidade

Para a análise de sensibilidade e calibração do modelo, neste estudo, foram selecionados 19 parâmetros do SWAT (Tabela 11). Esses parâmetros foram escolhidos conforme recomendações de Santos et al. (2014) e Santos (2016), que realizaram a calibração do SWAT para bacias em regiões semelhantes às da presente pesquisa, e constataram que esses parâmetros têm mais influência sobre a vazão para as condições das bacias hidrográficas brasileiras. Assim,

os demais parâmetros, que tem relação com a existência de neve, por exemplo, foram desprezados.

Para realizar a análise de sensibilidade e posteriormente a calibração automática dos parâmetros do modelo, é necessário definir a faixa de variação de cada parâmetro e o método de alteração no SWAT-CUP. Os métodos de alterações dos parâmetros são os seguintes:

- (a) substituição (v): o modelo substitui o valor existente por outro;
- (b) adição (a): um novo valor é adicionado ao valor inicial do parâmetro;
- (c) multiplicação (r): as alterações são realizadas variando o valor inicial por meio de porcentagens. Se a alteração for de aumentar o valor inicial do parâmetro em 50%, deve-se inserir no intervalo o valor de 0,5. Se for reduzir 25%, deve-se inserir -0,25, e assim sucessivamente (SANTOS, 2016).

De acordo com Abbaspour (2012) no processo de calibração automática não é indicada a utilização do método de substituição (v) para parâmetros que possuem variabilidade espacial, como CN2 e os parâmetros de solo. Essa recomendação deve-se ao fato da utilização deste método uniformizar toda a bacia, fazendo com que informações espaciais importantes para a modelagem, como as características do solo, sejam perdidas. Os parâmetros utilizados na análise de sensibilidade e, posteriormente, na calibração do modelo, bem como sua respectiva função e métodos de alterações dos parâmetros são apresentados na Tabela 11, com base em Ferrigo (2014) e Arnold et al. (2012).

Tabela 11 – Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo SWAT.

Parâmetro	Descrição	Método	Variação dos Valores	
			Mínimo	Máximo
Alpha_BF	Constante de recessão do fluxo de base (adim). Indicador da resposta do fluxo subterrâneo para as mudanças na recarga. Maiores valores desse parâmetro indicam maior recarga do aquífero e menor fluxo de base.	v	0	1
Biomix	Eficiência do revolvimento biológico (mm).	v	0	1
Canmx	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm). Representa a quantidade de água interceptada na copa das árvores.	v	0	10
CN2	Curva número na condição II (adim). Utilizado para o cálculo do escoamento superficial pelo método <i>SCS Curve Number</i> . É obtido em função da permeabilidade, do tipo de solo, do uso e da condição antecedente de umidade no solo.	r	-0,1	0,1
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h). É a taxa com que o rio perde água para o subsolo.	v	0	5
CH_N2	Coeficiente de Manning do canal principal ($s.m^{-1/3}$)	v	0	0,3
Epco	Fator de compensação de água pelas plantas (adim).	v	0	1

Parâmetro	Descrição	Método	Variação dos Valores	
			Mínimo	Máximo
Esco	Fator de compensação de evaporação do solo (adim). É um parâmetro importante no processo de evapotranspiração. Os valores desse parâmetro representam um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais elevados significam maior evaporação na camada superior do solo.	v	0,5	1
GW_Delay	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias). Ligado ao cálculo da recarga do aquífero e é dependente da formação geológica.	a	-30	60
GW_Revap	Coeficiente de ascensão da água à zona não saturada (adim). É designado como uma constante de proporcionalidade para o cálculo da quantidade máxima de água que se move no solo em resposta às deficiências de água.	v	0,02	0,2
Gwqmn	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer (mm). Quanto maior o valor desse parâmetro uma porção maior do fluxo de base é retardada.	v	0	1000
Rchrg_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (adim).	r	-0,04	0,05
Revapmn	Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm). Define o limite do nível de água no aquífero raso para que o movimento da água dentro do solo em resposta às deficiências de água ocorra.	v	0	10
S1subbsn	Comprimento da declividade média (m). Obtida do topo da encosta até o ponto onde o escoamento começa a se concentrar.	r	-0,25	0,25
Sol_Alb	Albedo do solo (fração).	r	-0,25	0,25
Sol_Awc	Capacidade de água disponível no solo (adim). Utilizado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação.	r	-0,25	0,25
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h). Necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada do solo.	r	-0,25	0,25
Sol_Z	Profundidade do solo (mm).	r	-0,25	0,25
Surlag	Coeficiente de atraso do escoamento superficial (adim). Menores valores representam maior atraso no escoamento superficial.	v	0	24

4.2.3 Calibração e validação

Calibrar um modelo significa que os parâmetros do mesmo serão ajustados de tal modo que os dados hidrológicos simulados pelo modelo estejam em concordância com os observados (ARNOLD et al., 2012). Para esta pesquisa, o número de iterações utilizadas para cada simulação foi de 1000, conforme sugere Abbaspour (2007), e a frequência de saída adotada foi a mensal.

Para a análise de eficiência do modelo, isto é, para verificar o quanto o modelo foi capaz de simular a realidade, foram utilizados o NSE e o R^2 , os quais estão descritos nas Eqs. 34 e 35:

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (34)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2} \right] \quad (35)$$

onde Q_{obs} é a vazão observada, Q_{sim} é vazão simulada pelo modelo, \bar{Q}_{obs} é a média da vazão observada, \bar{Q}_{sim} é a média da vazão simulada; n é a quantidade de dados na série de vazões observadas.

O NSE é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual quando comparado com a variação dos dados de medição. O índice varia entre $-\infty$ a 1, sendo que valores menores do que zero indicam que a média dos dados observados prevê melhor do que a simulação pelo modelo, enquanto valores próximos a um indicam um ajuste ótimo. Com relação ao R^2 , este coeficiente demonstra o grau de colinearidade entre os valores observados e simulados, descrevendo a proporção da variância entre esses valores. O R^2 varia entre 0 e 1, em que valores mais próximos a 1 indicam menor variância do erro (FERRIGO, 2014).

Para avaliar o desempenho do modelo foram observadas as sugestões de Santhi et al. (2001) que assumem que para simulações mensais, são aceitáveis valores de $R^2 > 0,6$ e $NSE > 0,5$.

Posteriormente à calibração, neste estudo foi realizada a validação do modelo usando um período de dados diferentes como dados de entrada, sem alterar nenhum parâmetro anteriormente ajustado. Segundo Benaman et al. (2005), a validação é o reprocessamento da simulação realizada na calibração. Essa etapa tem o propósito de verificar se o modelo tem a

habilidade de simular dados de outros períodos ou condições diferentes das quais foi calibrado. A resposta de saída do modelo nesta etapa foi analisada também na frequência mensal.

4.3 SWAT CHECK

O SWAT Check foi desenvolvido por White et al. (2012) com o objetivo de auxiliar os utilizadores do modelo SWAT a detectar possíveis erros no início da simulação e, desta forma, otimizar o processo de modelagem. Trata-se de uma ferramenta associada ao ArcSWAT, que é utilizada para visualizar, de maneira resumida, os resultados obtidos na simulação realizada com o SWAT. Para este estudo, a versão adotada do programa foi a SWAT Check 1.2.0.7 (Figura 19).

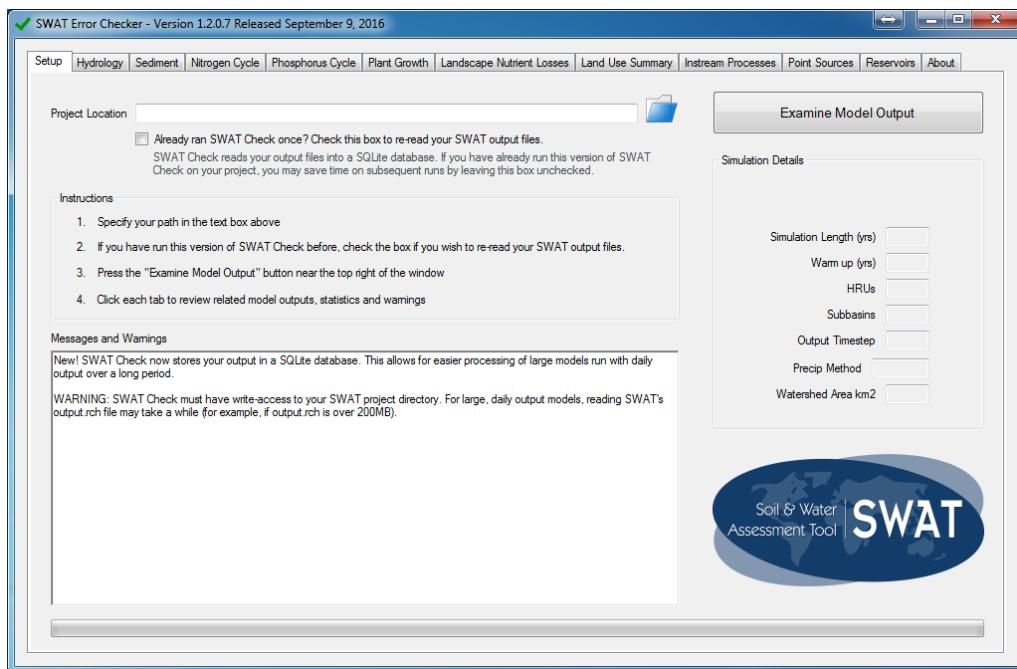


Figura 19 – Interface do programa SWAT Check. Nas abas do programa são apresentadas as informações referentes a cada processo analisado.

De acordo com White et al. (2012), o SWAT Check executa três funções:

- Lê os arquivos de saída de uma determinada simulação gerada pelo SWAT e alerta o usuário sobre resultados fora do padrão (por exemplo, valores muito baixos de escoamento superficial);
- Cria figuras baseadas nos processos simulados para melhor visualização dos resultados da simulação (Figura 20), agrupando esses processos em grupos, tais como: processos hidrológicos, sedimentológicos, ciclo de nitrogênio e ciclo de fósforo;

- c. Detecta e alerta o usuário sobre os erros comuns de aplicação do modelo, erros que com recorrência são apresentados à equipe de suporte do SWAT.

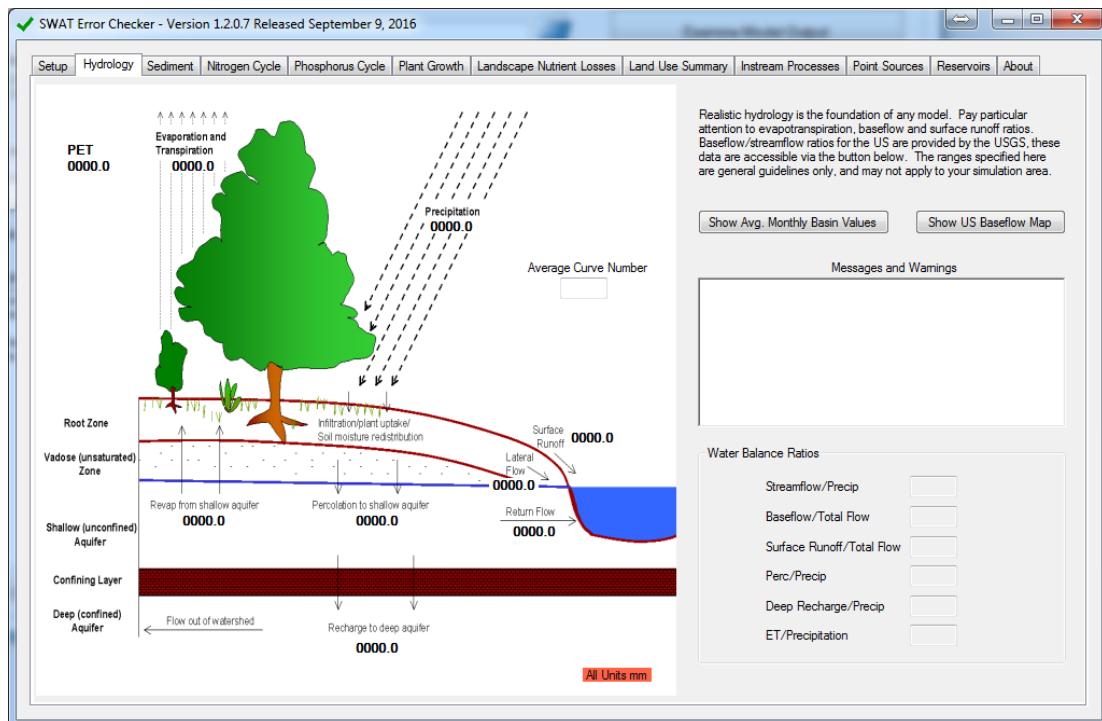


Figura 20 – Exemplo de figura gerada pelo SWAT Check, destacando os processos hidrológicos. Ao lado direito se observa o quadro *Messages and Warnings*, onde são apresentados os possíveis problemas da modelagem.

Vale salientar que nem sempre os valores padrões que são tomados como base pelo SWAT Check são adequados a determinadas pesquisas. Deve-se considerar que estes valores padrões foram obtidos com base na literatura e julgamento profissional dos desenvolvedores do SWAT (WHITE et al., 2012). Entretanto, tendo em vista que o SWAT tem sido aplicado em diversos ambientes, apresentando resultados coerentes, é possível que valores diferentes aos previstos como padrões sejam aceitos, respeitando-se as peculiaridades dos diversos ambientes existentes.

Para executar as funções descritas acima, o SWAT Check acessa três arquivos principais de saída do SWAT: (a) o arquivo de saída padrão (output.std), que contém as URHs, (b) os valores médios das bacias hidrográficas para uma variedade de saídas e (c) os arquivos de saída dos canais (output.rch) e reservatórios (output.rsv), que contêm informações para cada canal e reservatório individualmente.

Neste trabalho, o SWAT Check foi utilizado para obter esquematicamente o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, após sua calibração. Assim, foram utilizados como dados de entrada os arquivos finais da calibração do modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Modelagem inicial da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa

Após a preparação do banco de dados, foi iniciada a etapa de modelagem do balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. Esse processo foi dividido em duas partes: (a) a modelagem da bacia hidrográfica do Rio Taperoá entre 1970 e 1990, baseada nos dados fluviométricos disponíveis do posto Poço de Pedras e (b) a modelagem da bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba, para o período de 1973 a 1990, baseada nos dados fluviométricos do posto Caraúbas.

Na modelagem inicial, foram geradas as sub-bacias e URHs para cada projeto. A bacia do Rio Taperoá foi discretizada em 29 sub-bacias (Figura 21) e 467 URHs, e a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba foi discretizada em 31 sub-bacias (Figura 22) e 386 URHs. As Figuras 23 e 24 mostram os primeiros resultados da modelagem sem calibração, para os posto Poço de Pedras e Caraúbas.

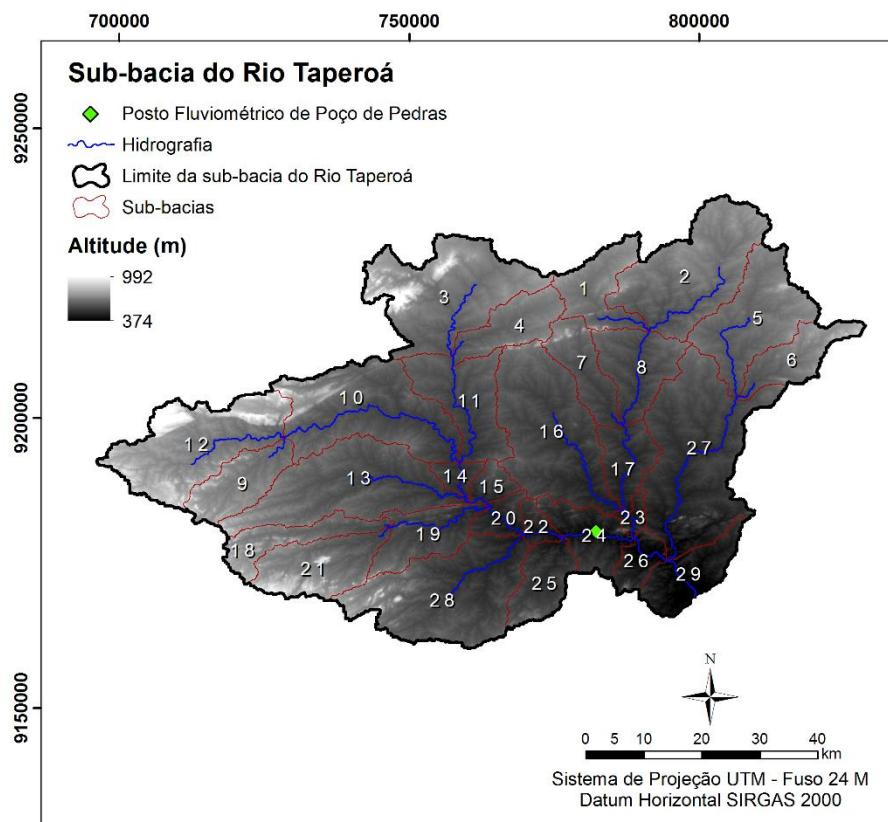


Figura 21 – Sub-bacias geradas pelo modelo SWAT na modelagem da bacia hidrográfica do Rio Taperoá.

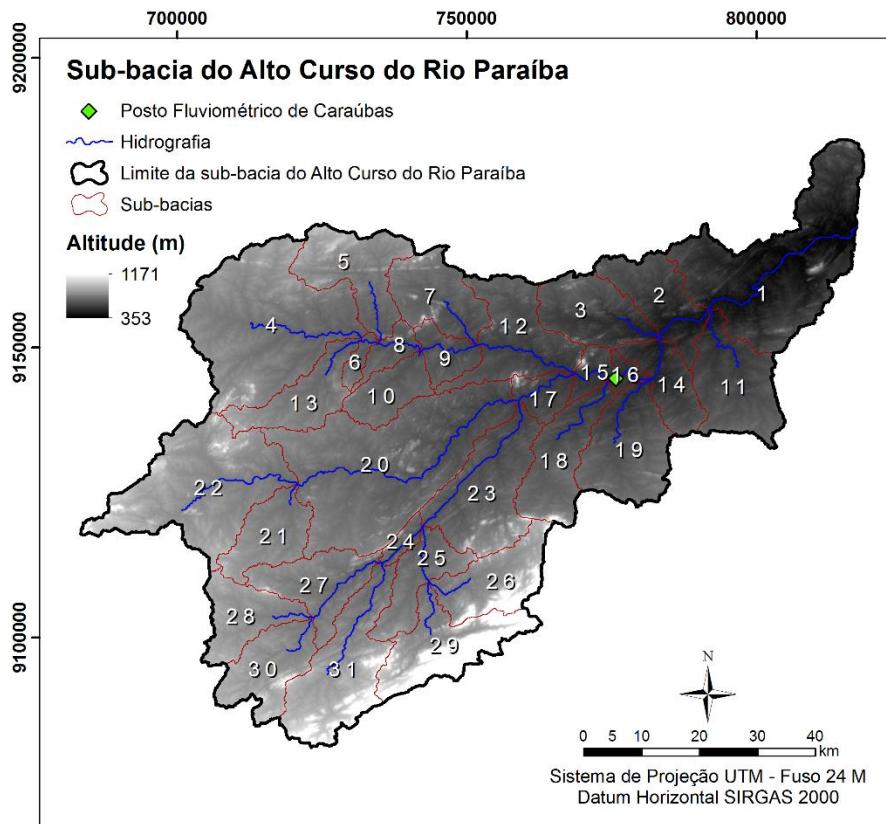


Figura 22 – Sub-bacias geradas pelo modelo SWAT na modelagem da bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba.

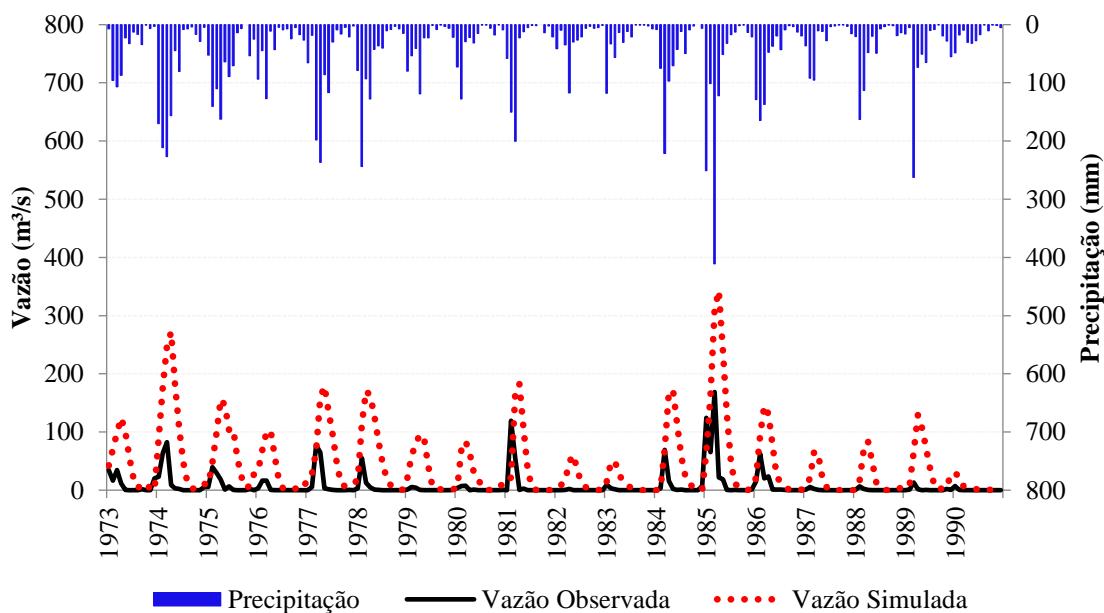


Figura 23 – Vazões simulada (sem calibração) e observada para o posto fluviométrico Caraúbas.

De acordo com o hidrograma apresentado na Figura 23, observa-se que a modelagem inicial, sem nenhum ajuste dos parâmetros do modelo SWAT fez com que o modelo

superestimasse as vazões simuladas para o posto fluviométrico Caraúbas em todos os picos, quando comparados com as vazões observadas e, ainda, observou-se que o modelo não conseguiu reproduzir bem os eventos de baixa vazão. Entretanto, observa-se que o modelo representou bem o comportamento da bacia para a maioria dos picos de ascensão, pois, fazendo-se uma análise visual, pode-se observar que as vazões responderam aos picos de precipitação. Observou-se que houve um deslocamento para a direita dos valores simulados se comparados com os observados, ou seja, os picos de vazão simulada ocorreram depois dos seus respectivos observados.

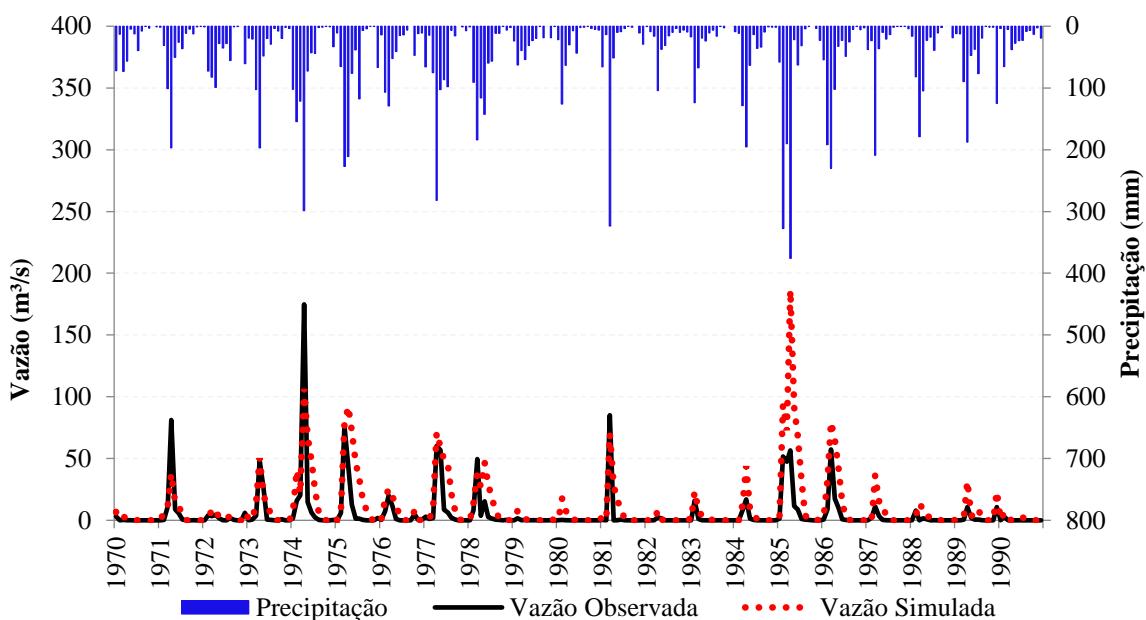


Figura 24 – Vazões simulada (sem calibração) e observada com base no posto fluviométrico Poço de Pedras.

Observando-se o hidrograma apresentado na Figura 24 nota-se que, mesmo que não tenha sido feita a calibração, a série de vazões simuladas acompanhou as vazões observadas. Observa-se também que os picos de vazão corresponderam aos picos de precipitação que podem ser visualizados no hietograma, demonstrando que o modelo representou bem os processos hidrológicos de acordo com os dados de entrada inseridos para o posto Poço de Pedras.

Vale destacar, ainda, que de acordo com a Figura 24, dois eventos apresentaram-se discrepantes com relação à comparação entre os dados observados e os simulados: um evento em abril de 1974, onde houve uma subestimação das vazões e outro evento em abril de 1985, onde o modelo superestimou as vazões observadas. Com relação ao evento do ano 1985, observa-se que este apresentou o mais alto pico de precipitação da série analisada, entretanto, percebe-se que a vazão observada neste ano foi menor que a vazão observada em um evento

observado em março de 1981, por exemplo, que teve um pico menor de precipitação, podendo-se julgar que houveram erros nas medições de vazões para o evento destacado no ano de 1985. Da mesma forma, pode-se pensar para o evento de 1974, onde a precipitação foi menor que a ocorrida em 1985, mas a vazão observada foi muito maior que em 1985. A Tabela 12 mostra a comparação entre as séries observadas e simuladas de acordo com os dois postos fluviométricos analisados.

Tabela 12 – Comparação entre as vazões observadas e as simuladas pelo modelo SWAT na modelagem inicial.

Estatísticas	Poço de Pedras		Caraúbas	
	Vazão Observada (m ³ /s)	Vazão Simulada (m ³ /s)	Vazão Observada (m ³ /s)	Vazão Simulada (m ³ /s)
Média	5,28	10,86	7,28	43,53
Máxima	174,78	186,40	168,63	342,90
Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00

De acordo com a Tabela 12, houve grande variação entre as médias de vazões observadas e simuladas para os dois postos. A variação entre as vazões médias observadas e simuladas para o posto de Poço de Pedras foi de 105%, e para o posto de Caraúbas de 497%, o que demonstra claramente a superestimação das vazões pelo modelo SWAT. Este fato pode ser analisado também pela diferença entre as vazões máximas simuladas e observadas, embora as vazões máximas do posto Poço de Pedras tenham apresentado valores próximos, a vazão simulada foi superestimada. No posto de Caraúbas, essa diferença foi mais evidente, pois a vazão simulada foi de 342,90 m³/s, enquanto que a observada foi de 168,63 m³/s. Estas superestimações podem estar relacionadas ao fato de que não foram modelados os reservatórios presentes nos limites das bacias, desse modo não houve retenção da água e, consequentemente, ocorreu uma elevação no escoamento superficial.

As situações observadas nos hidrogramas podem ser corroboradas pela análise estatística, utilizando os indicadores NSE e R². Para a modelagem inicial com base no posto Caraúbas, foram obtidos valores de NSE e R² de -8,56 e 0,23, respectivamente. Para a modelagem inicial com base no posto Poço de Pedras, foram obtidos valores de NSE e R² de 0,06 e 0,54. Estes valores encontram-se dispostos na Tabela 13. Considerando os valores de referência fixados anteriormente de NSE > 0,5 e R² > 0,6, observa-se que ambas as simulações apresentaram valores fora do aceitável. O único valor que se aproximou do aceitável foi o R² para a modelagem da bacia do Rio Taperoá (R² = 0,54), o que justifica a análise visual feita através da boa correspondência entre as séries do hidrograma. Entretanto, o valor baixo de NSE (0,06) justifica a discrepância observada nos dois picos destacados.

Tabela 13 – Valores dos índices de desempenho obtidos na modelagem inicial, sem calibração (período de 1970 a 1990 para o posto Poço de Pedras e 1973 a 1990 para o posto Caraúbas).

Índice de desempenho	Valores de referência	Poço de Pedras	Caraúbas
R ²	0,6	0,54	0,23
NSE	0,5	0,06	-8,56

Tendo em vista que as duas modelagens iniciais se apresentaram fora dos padrões estatísticos esperados, e, ainda, que o modelo SWAT dispõe de uma grande quantidade de parâmetros ajustáveis, foi necessário que se realizasse o processo de calibração automática. Os resultados desse processo serão apresentados nos próximos itens.

5.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT

A análise de sensibilidade foi realizada para identificar os parâmetros que exercem maior influência sobre os resultados gerados. De acordo com Sorooshian e Gupta (1995), existem dois tipos de parâmetros: parâmetros físicos e parâmetros de processo, onde os parâmetros físicos representam as propriedades físicas da bacia hidrográfica e são usualmente mensuráveis, tais como a área da bacia, a fração impermeável, a declividade, entre outros e os parâmetros de processo representam as características da bacia que normalmente não são medidas, tais como a profundidade média da capacidade de armazenamento de água no solo, a taxa efetiva do interfluxo lateral, o coeficiente de não-linearidade da taxa de controle da velocidade de percolação para o armazenamento de águas subterrâneas, etc.

Pechlivanidis et al. (2011) ressalvam, ainda, que existem alguns parâmetros físicos, como a condutividade hidráulica e a porosidade, que são mensuráveis em teoria, mas de difícil medição na prática e, portanto, tendem a ser calibrados. Ferrigo (2014) complementa que, além disso, os valores eventualmente medidos podem não ser representativos na escala da modelagem.

Estudos realizados em bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro, utilizando o modelo SWAT e o SWAT-CUP em suas calibrações, demonstram similaridades entre os parâmetros mais sensíveis observados. A Tabela 14 apresenta os 10 parâmetros mais sensíveis em quatro estudos realizados nas bacias hidrográficas nordestinas, organizados em ordem decrescente de relevância.

Nesta pesquisa, a análise de sensibilidade foi obtida após 1000 iterações do modelo por meio da ferramenta SWAT-CUP, tanto para a bacia do Rio Taperoá, quanto para a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba. Os intervalos dos parâmetros utilizados e seus respectivos métodos de variação são apresentados na Tabela 11.

Tabela 14 – Parâmetros mais sensíveis para bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro.

	Aragão et al. (2013)	Alves da Silva (2015)	Santos (2016)	Dantas (2016)
1	ALPHA_BF	CN2	SOL_AWC	GWQMN
2	SOL_Z	GW_DELAY	CN2	GW_REVAP
3	ESCO	GWQMN	SOL_K	CN2
4	GWQMN	GW_REVAP	GW_REVAP	ESCO
5	GW_DELAY	SOL_AWC	SLSUBBSN	GW_DELAY
6	CH_N2	SOL_Z	CANMX	SOL_AWC
7	CN2	ALPHA_BF	GW_DELAY	CH_K2
8	CH_K2	BIOMIX	GWQMN	CANMX
9	SURLAG	SOL_K	SOL_Z	SLSUBBSN
10	GW_REVAP	CANMX	ALPHA_BF	SOL_Z

Nas Figuras 25 e 26 podem ser observados os resultados da análise de sensibilidade gerados com base nos postos fluviométricos Poço de Pedras e Caraúbas, respectivamente. Para identificar os parâmetros mais sensíveis foram avaliados os resultados do *t-stat*, que indicam o grau da sensibilidade (quanto maior for o seu valor absoluto, mais sensível é o parâmetro) e do *p-value*, que determinam a significância da sensibilidade dos parâmetros (valores próximos de zero apresentam maior significância na modelagem específica).

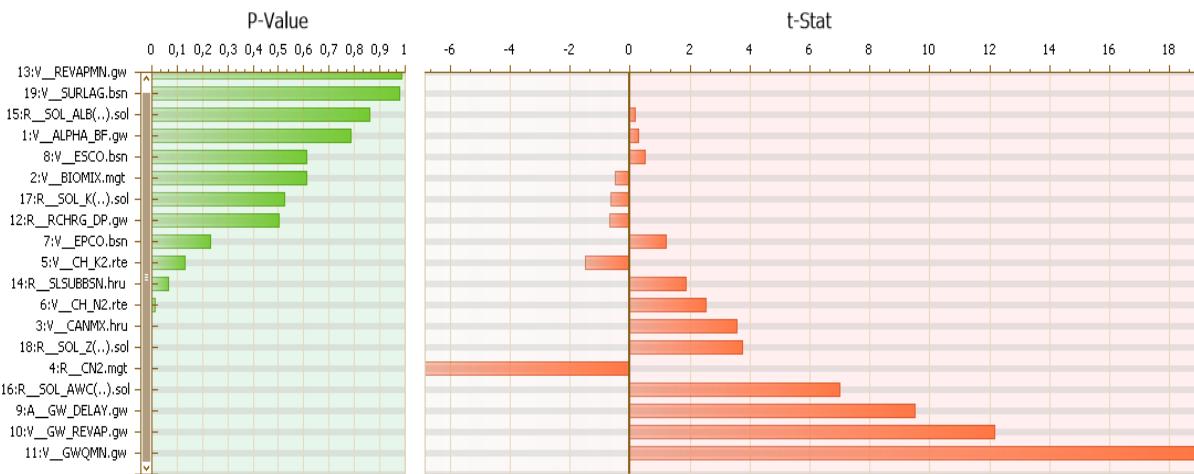


Figura 25 – Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT com base no posto fluviométrico Poço de Pedras.



Figura 26 – Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT com base no posto fluviométrico Caraúbas.

De acordo com as Figuras 25 e 26, dentre os 10 parâmetros mais sensíveis de cada projeto, pode-se destacar nove que foram comuns às duas análises, sendo considerados, portanto, os parâmetros que mais influenciam à produção de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. Estes parâmetros, bem como os processos a eles relacionados, encontram-se listados na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, em ordem decrescente de relevância.

Parâmetro	Processo
GW_REVAP	Água subterrânea (.gw)
GWQMN	Água subterrânea (.gw)
GW_DELAY	Água subterrânea (.gw)
SOL_AWC	Solos (.sol)
SOL_Z	Solos (.sol)
CANMX	Evapotranspiração (.hru)
CH_K2	Escoamento superficial (.rte)
CN2	Escoamento superficial (.mgt)
SLSUBBSN	Tempo de concentração (.hru)

Dentre os nove parâmetros destacados, os parâmetros SOL_AWC, CN2, SOL_Z, CH_K2 e SLSUBBSN influenciam na geração de escoamento superficial. O GW_REVAP, GW_DELAY, GWQMN, influenciam o fluxo de base, e o CANMX influencia na evapotranspiração.

Observa-se que, apesar de os solos existentes na área de estudo serem rasos, não constando a presença de aquíferos profundos ou mesmo rasos, foram identificados três parâmetros relacionados ao fluxo de base, o que pode estar relacionado com o fato de que já

que não foram modelados os reservatórios existentes na bacia hidrográfica, a calibração, por meio do algoritmo SUFI-2 compensou o armazenamento de água que deveria ser feito por meio dos reservatórios através destes parâmetros, fazendo com que esse armazenamento fosse feito no solo.

Comparando-se os parâmetros mais sensíveis observados neste trabalho, com os destacados nos estudos apresentados na Tabela 14, constatou-se que, com relação ao trabalho de Aragão et al. (2013), foram identificados seis parâmetros em comum; com relação ao trabalho de Alves da Silva (2015), sete parâmetros foram coincidentes; com relação ao trabalho de Santos (2016), foram identificados oito parâmetros em comum; e com relação ao trabalho de Dantas (2016), a mesma quantidade de parâmetros (nove) foram coincidentes. Vale ressaltar que os parâmetros CN2, GW_DELAY, GW_REVAP, GWQMN e SOL_Z foram recorrentes em todos os trabalhos citados acima, incluindo esta pesquisa.

É importante destacar também, que os trabalhos de Alves da Silva (2015) e Dantas (2016) foram realizados na bacia hidrográfica do Rio Taperoá. É plausível, portanto, que a maioria dos parâmetros obtidos como mais sensíveis para esses autores também tenham sido evidenciados nesta pesquisa, uma vez que essa é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. O trabalho de Aragão et al. (2013) foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Japaratuba, localizada no Estado do Sergipe, destacando-se nessa área duas regiões climáticas: agreste (precipitação média de 800 mm) e semiárido (precipitação média de 500 mm). Já o trabalho de Santos (2016), foi realizado na bacia representativa do Rio Tapacurá, localizada numa zona de transição entre agreste e zona da mata, no Estado de Pernambuco.

5.3 Calibração do modelo SWAT

A calibração foi realizada de maneira automática por meio da ferramenta SWAT-CUP. Como mencionado anteriormente, foram realizadas duas calibrações, uma para o posto fluviométrico Poço de Pedras e outra para o posto fluviométrico Caraúbas. Para cada projeto, foram realizadas três simulações de 1000 iterações cada. Com relação ao posto fluviométrico Poço de Pedras, o melhor resultado usando o algoritmo SUFI-2 foi na iteração de número 245 na terceira simulação. Para o posto fluviométrico de Caraúbas, o algoritmo SUFI-2 atingiu o melhor resultado na iteração de número 41, também na terceira simulação.

Ao final de cada simulação, o SWAT-CUP forneceu um novo *ranking* de parâmetros com os melhores valores para executar uma nova simulação. Isto é, o SWAT-CUP reavalia as faixas de variação dos parâmetros selecionados, de acordo com a função objetivo escolhida e

sugere uma nova faixa de variação que poderá ser usada na próxima simulação. É necessário que o novo *ranking* de parâmetros seja analisado de acordo com os conhecimentos hidrológicos do modelador. Os valores finais dos parâmetros calibrados por meio da ferramenta SWAT-CUP, para ambos os projetos executados, encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores calibrados dos parâmetros baseados nos postos fluviométricos Poço de Pedras e Caraúbas.

Parâmetros	Poço de Pedras	Caraúbas
ALPHA_BF	0,6351	0,9335
BIOMIX	0,3431	0,9417
CANMX	2,5465	33,6393
CN2	-0,0235	0,0746
CH_K2	1,0279	3,8123
CH_N2	0,2943	0,0408
EPCO	0,7376	0,5975
ESCO	0,5999	0,8358
GW_DELAY	46,7653	47,5971
GW_REVAP	0,1680	0,1958
GWQMN	963,7499	949,7173
RCHRG_DP	-0,0313	-0,0043
REVAPMN	0,3920	3,8916
SLSUBBSN	0,0403	0,1304
SOL_ALB	0,1150	0,0977
SOL_AWC	0,0054	0,2117
SOL_K	0,1030	-0,1824
SOL_Z	0,2262	0,1962
SURLAG	16,9804	5,0763

As Figuras 27 e 28 mostram os hidrogramas das vazões simulada e observada, de acordo com as medições observadas nos postos fluviométricos de Poço de Pedras e Caraúbas, respectivamente, bem como os hietogramas respectivos a cada período.

Analizando-se o hidrograma apresentado na Figura 27, de acordo com análise visual, observa-se que o modelo conseguiu representar de maneira satisfatória o comportamento da vazão da bacia hidrográfica do Rio Taperoá. Observou-se uma boa representação das vazões menores e uma boa correspondência da vazão simulada comparada aos picos de precipitação representados no hietograma. Entretanto, notou-se que o modelo tendeu a subestimar as vazões observadas, com exceção do evento ocorrido em abril de 1985, no qual a vazão estimada foi superestimada ($104,90 \text{ m}^3/\text{s}$) quando comparada com a vazão observada ($56,59 \text{ m}^3/\text{s}$). Este pico de vazão também foi superestimado na modelagem inicial, e, embora após a calibração a resposta para este ponto específico tenha reduzido, ainda continuou constando como uma superestimação, com relação aos dados observados. Ainda supondo que houveram erros nas medições de vazão realizadas no ano de 1985, pode-se ressaltar que o baixo valor de vazão

observada para este ano influenciou na calibração do modelo, causando subestimação nos demais picos.

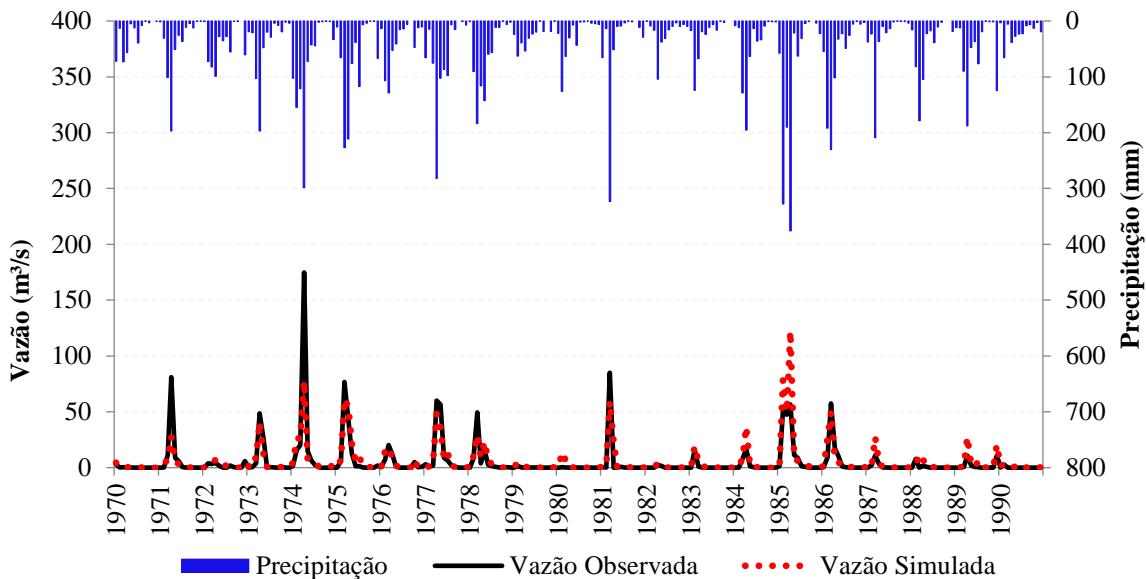


Figura 27 – Vazões simuladas e observadas para o posto fluviométrico Poço de Pedras.

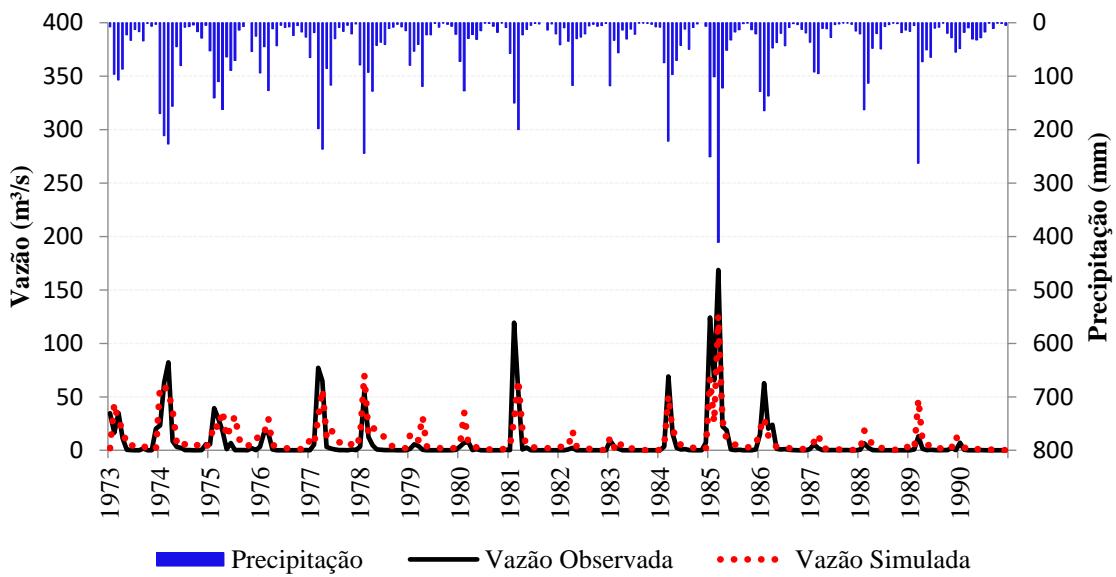


Figura 28 – Vazões simuladas e observadas para o posto fluviométrico Caraúbas.

A Figura 28 demonstra que a vazão de base foi superestimada durante os primeiros anos da série e os picos de vazão foram mais uma vez subestimados, mas, de maneira geral observou-se um bom comportamento da vazão simulada com relação à vazão observada, o que também foi comprovado estatisticamente com base nos índices de desempenho utilizados. A Tabela 17

mostra a comparação entre as séries observadas e simuladas de acordo com os dois postos fluviométricos analisados. A Figura 29 mostra os resultados da correlação entre os dados observados e simulados para os dois postos fluviométricos.

Tabela 17 – Comparação entre as vazões observadas (m^3/s) e as simuladas (m^3/s) pelo modelo SWAT após a realização da calibração.

Estatísticas	Poço de Pedras		Caraúbas	
	Vazão Observada	Vazão Simulada	Vazão Observada	Vazão Simulada
Média	5,28	5,68	7,28	9,33
Máxima	174,78	122,30	168,63	125,60
Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00

Observou-se, de acordo com a Tabela 17, que a variação entre as médias das vazões observadas e simuladas nos dois postos reduziram consideravelmente, quando comparadas às médias obtidas na modelagem inicial. A variação das médias das vazões com relação ao posto Poço de Pedras após a calibração foi de 7%, enquanto na modelagem inicial foi de 105%. Com relação ao posto de Caraúbas, a variação foi de 28% após a calibração, e na modelagem inicial foi de 497%, mostrando uma boa adequação do modelo. Com relação às diferenças entre as vazões máximas simuladas e observadas, percebe-se que estas também reduziram bastante, embora nos dois casos, o modelo tenha superestimado as vazões.

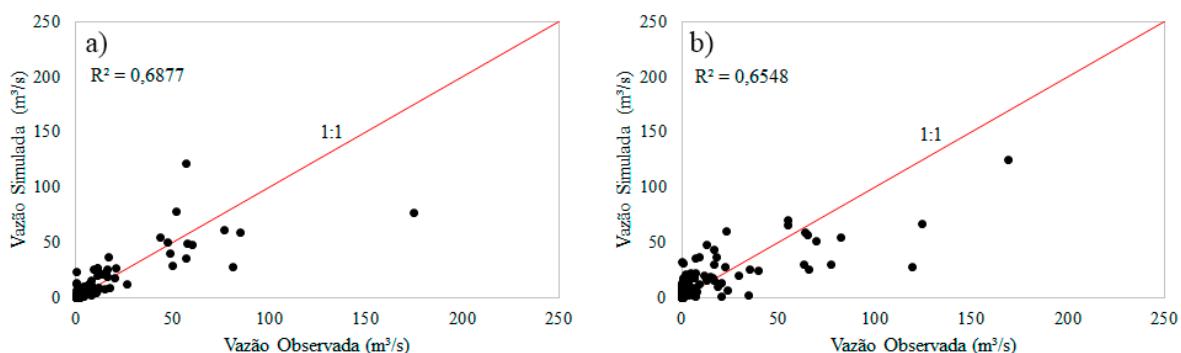


Figura 29 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas na etapa de calibração para os postos fluviométricos: (a) Poço de Pedras e (b) Caraúbas.

De acordo com as Figuras 29a e 29b, observou-se que a maioria dos eventos observados acima de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ foram subestimados com relação à vazão simulada para ambos os postos analisados. Essa superestimação dos dados simulados com relação aos dados observados de vazão pode estar relacionada à existência de reservatórios nos limites da área de estudo, como comentado no item sobre a modelagem inicial, quando houve superestimação dos dados

simulados com relação aos observados. Na calibração automática do modelo, o algoritmo SUFI-2 tenta ajustar, da melhor maneira, os parâmetros selecionados, com base na faixa de valores fornecida e com base na função objetivo selecionada, dessa maneira, embora os reservatórios não tenham sido inseridos na modelagem, o algoritmo tenta ajustar os parâmetros de modo a fornecer um resultado próximo ao observado. Nesse sentido, o fato das vazões simuladas, em sua maior parte, terem subestimado as vazões observadas pode ser justificado por falhas na parametrização da bacia, sobretudo com relação a não inserção dos reservatórios na modelagem.

Os resultados de desempenho do modelo, obtidos por meio dos indicadores estatísticos, podem ser observados na Tabela 18. Os resultados obtidos mostraram que o modelo foi calibrado para os dois projetos, apresentando valores dos índices de desempenho dentro do que se pré-fixou como adequado ($R^2 > 0,6$ e $NSE > 0,5$).

Tabela 18 – Resultado dos índices de desempenho na fase de calibração (período de 1970 a 1990 para o posto Poço de Pedras e 1973 a 1990 para o posto Caraúbas).

Índice de desempenho	Valores de referência	Poço de Pedras	Caraúbas
R^2	0,6	0,69	0,65
NSE	0,5	0,69	0,64

A Figura 30 mostra a espacialização das médias anuais de escoamento superficial por sub-bacia, referentes aos dois projetos executados. Para tanto, a fim de facilitar a visualização dos escoamentos nas sub-bacias da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, foi gerado um mapa, definindo-se como exutório da bacia o ponto a jusante do Açude Epitácio Pessoa. Para compor este mapa, foram utilizados os resultados obtidos das simulações realizadas para as duas bacias (Taperoá e Alto Curso do Rio Paraíba).

Os resultados apresentados na Figura 30 mostram que os valores mais altos de escoamento superficial foram obtidos na parte centro-sul da bacia, enquanto que os valores mais baixos se concentraram em toda a porção leste, próximo ao Açude Epitácio Pessoa, e sudoeste da bacia.

Analizando a relação entre a Figura 30 e o mapa de uso e ocupação do solo da bacia (Figura 14), observou-se que na parte centro-sul, onde ocorreram os maiores valores de escoamento superficial, predominam as classes solo exposto e vegetação herbácea. Como esperado, estes maiores valores devem-se ao fato da reduzida ou inexistente proteção do solo pela vegetação, pois, de acordo com Brandt (1986), a cobertura vegetal atua reduzindo o volume de água que chega ao solo, através da interceptação e alterando a distribuição do tamanho das gotas de chuva, afetando, com isso, a energia cinética da chuva. Beltrame (1994) complementa

que a cobertura vegetal além de aumentar a porosidade e a permeabilidade do solo, por meio da ação das raízes, ainda reduz o escoamento superficial e mantém sua umidade e fertilidade, pela presença de matéria orgânica.

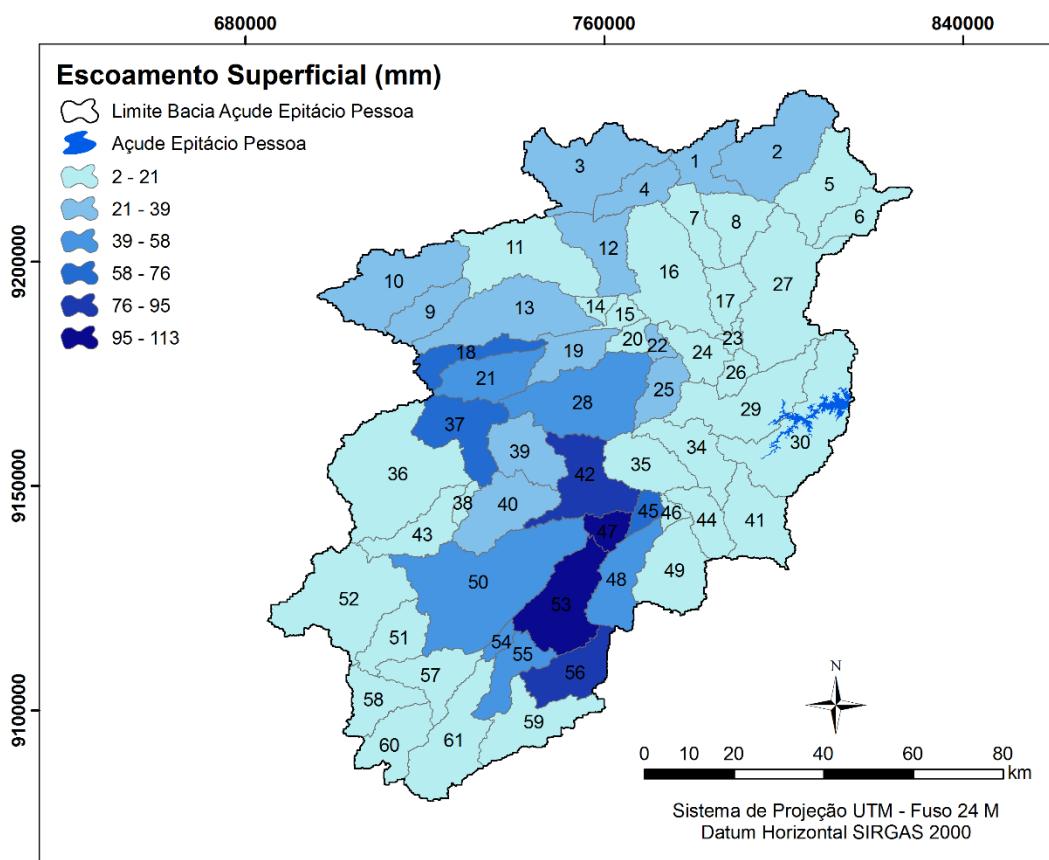


Figura 30 – Espacialização das médias anuais de escoamento superficial, por sub-bacia, na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de calibração (1970 a 1990).

Com relação às porções em que existe a predominância da classe vegetação arbórea, porções sudoeste e nordeste da bacia, bem como de vegetação arbustiva, ambas apresentaram valores menores de escoamento superficial, o que também já era de se esperar, destacando-se, mais uma vez, a importância da cobertura vegetal na proteção do solo e retenção da precipitação para abastecimento dos aquíferos subterrâneos.

Ainda de posse dos resultados da calibração, foi possível gerar o mapa de espacialização das médias anuais de evapotranspiração real da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa (Figura 31), por sub-bacias. Este mapa foi constituído de maneira análoga a Figura 30.

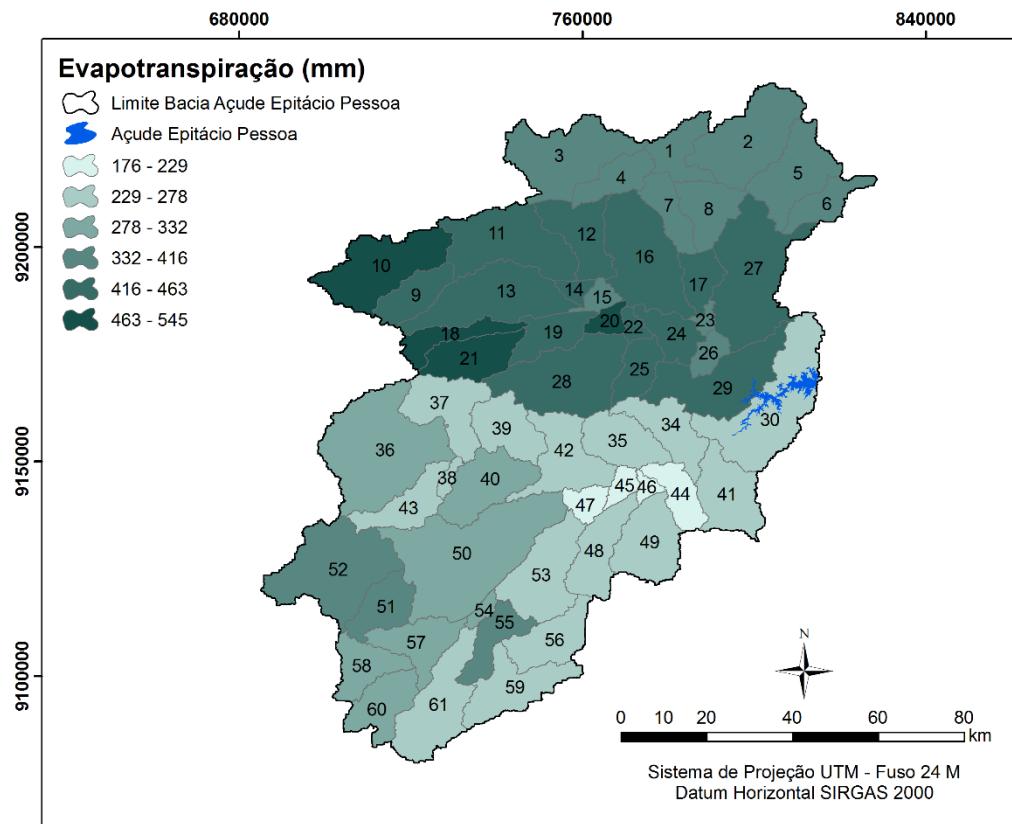


Figura 31 – Espacialização das médias anuais de evapotranspiração real, por sub-bacia, para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de calibração (1970 a 1990).

Observa-se, de acordo com a Figura 31 que a média de evapotranspiração real das sub-bacias foi de 350 mm, onde 53% das sub-bacias apresentaram valores maiores que a média e 47% das sub-bacias apresentaram valores inferiores à média. Observa-se ainda, que a área correspondente à bacia hidrográfica do Rio Taperoá apresentou valores maiores de evapotranspiração real com relação à bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba. Essa diferença ficou nitidamente destacada na Figura 31, o que pode estar relacionado ao fato de terem sido executados dois projetos para a calibração da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

5.4 Validação do modelo SWAT

O processo de validação do modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa consistiu em aplicar novamente o modelo, utilizando os parâmetros que foram calibrados com o programa SWAT CUP. Esse processo foi realizado mais uma vez, em dois projetos, assim como na fase de calibração. Foram utilizados, em cada projeto, os mesmos

dados de entrada da modelagem inicial e calibração, alterando-se apenas os dados referentes às séries de precipitação, sendo o período adotado para a validação o de 1994 a 2014.

Os valores referentes aos índices de desempenho utilizados para a avaliação de desempenho do modelo para os postos fluviométricos de Poço de Pedras e Caraúbas podem ser observados na Tabela 19. A Figura 32 mostra o resultado da correlação entre as vazões observadas e simuladas para os postos fluviométricos de Poço de Pedras e de Caraúbas na etapa de validação.

Tabela 19 – Resultado dos índices de desempenho na fase de validação (período de 1994 a 2014).

Índice de desempenho	Valores de referência	Poço de Pedras	Caraúbas
R^2	0,6	0,87	0,56
NSE	0,5	0,80	0,41

Os resultados dos índices de desempenho revelaram que a validação baseada no posto fluviométrico de Poço de Pedras se mostrou aceitável enquanto à baseada no posto fluviométrico de Caraúbas não correspondeu ao mínimo admissível fixado como referência. Entretanto, não se devem desconsiderar os resultados, uma vez que estiveram muito próximo ao mínimo admissível, apresentando valores de $NSE = 0,41$ e $R^2 = 0,56$, ambos muito próximos aos estabelecidos como referência.

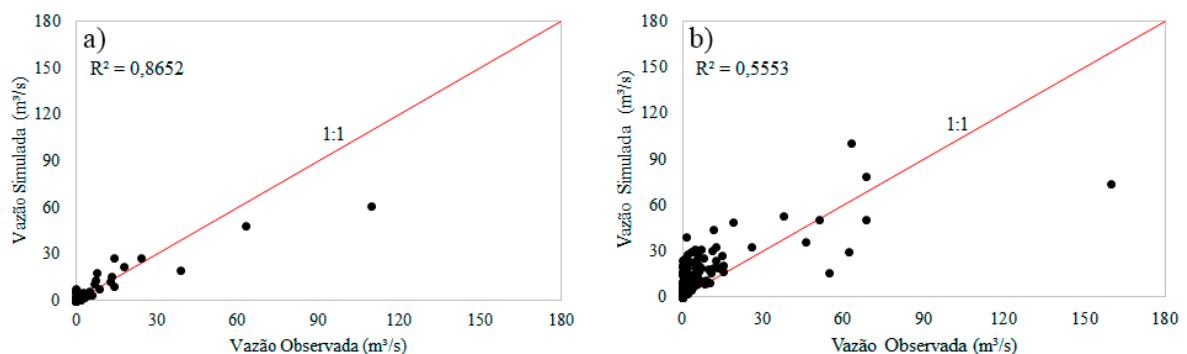


Figura 32 – Comparação entre as vazões observadas e simuladas na etapa de validação para os postos fluviométricos: (a) Poço de Pedras e (b) Caraúbas.

De acordo com a Figura 32 observou-se, primeiramente com base na Figura 32a, que os dados simulados estiveram próximos aos observados, excetuando-se três pontos que se destacaram como subestimados com relação aos dados observados. Já, com relação à Figura 32b, observa-se que houve superestimação dos dados simulados com relação aos dados observados.

A Figura 33 mostra a espacialização das médias anuais do escoamento superficial, por sub-bacia, na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, para o novo período entre 1994 e 2014. Comparando-se a Figura 33 com a Figura 30, que apresentou a espacialização dos valores totais anuais de escoamento superficial obtidos no período de calibração do modelo, observou-se que houve uma redução do escoamento superficial nas sub-bacias que haviam apresentado as maiores médias. Além disso, no geral, os valores obtidos de escoamento superficial na etapa de validação foram mais baixos quando comparados aos obtidos na etapa de calibração. Uma possível razão para essa diminuição pode estar relacionada ao regime pluviométrico no período de validação, que foi inferior ao do período de calibração, conforme é mostrado na Figura 34.

Com relação à comparação da espacialização do escoamento superficial médio com o mapa de uso e ocupação do solo, como esperado, mais uma vez percebeu-se que os valores mais altos ocorreram em áreas com classes solo exposto ou vegetação herbácea; enquanto que os menores valores foram obtidos em áreas com vegetação de porte relativamente maior, como por exemplo nas áreas onde predominam as classes vegetação arbórea ou vegetação arbustiva.

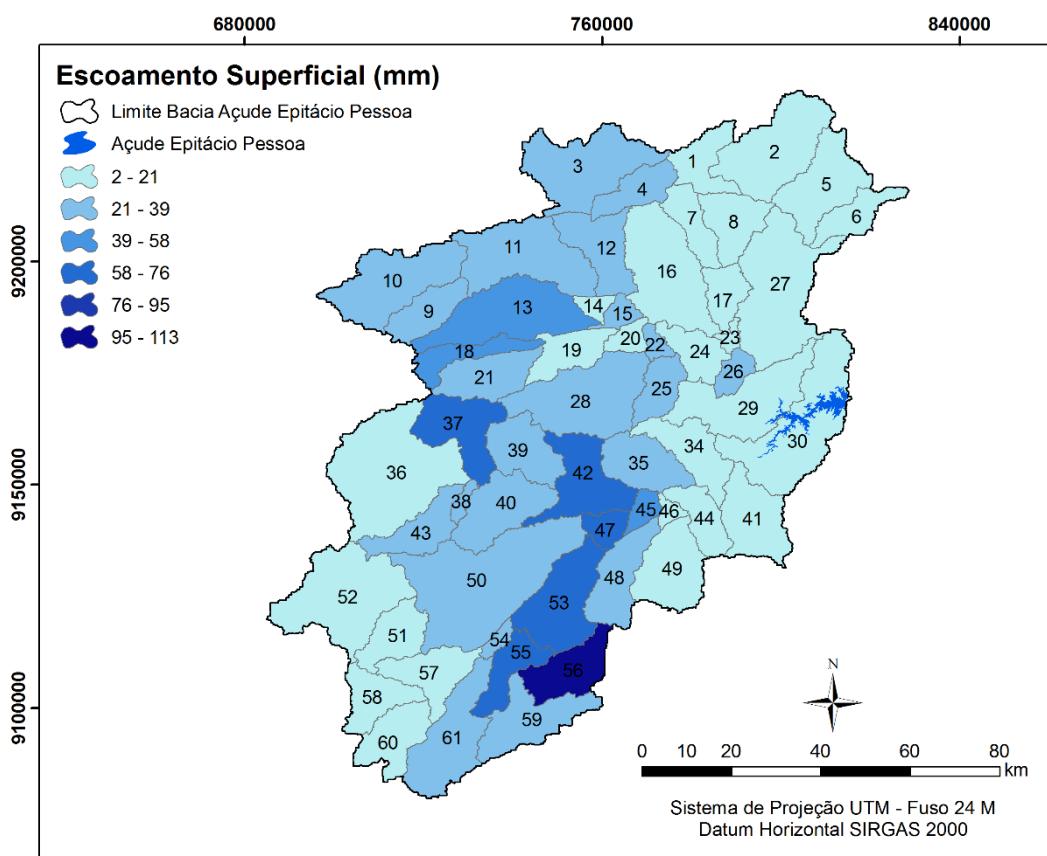


Figura 33 – Espacialização das médias anuais de escoamento superficial, por sub-bacia, na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de validação (1994 a 2014).

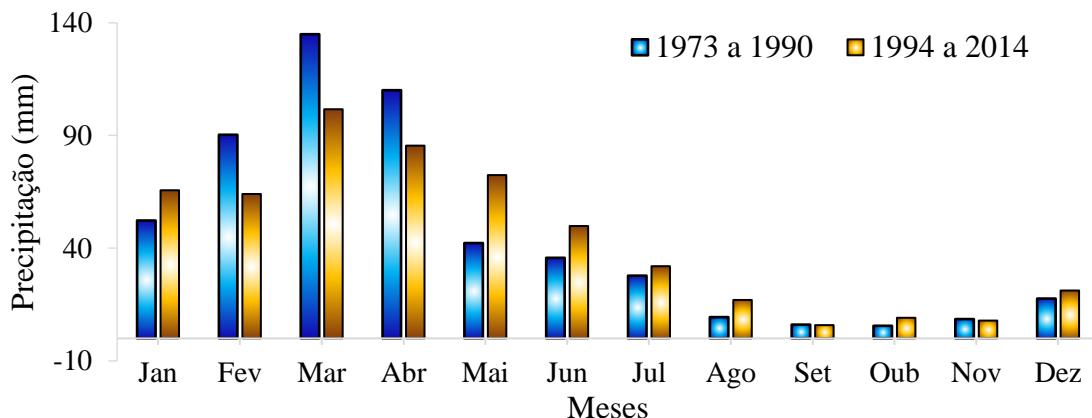


Figura 34 – Comportamento da precipitação média mensal na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa entre os anos de 1970 e 1990 (período de calibração) e 1994 e 2014 (período de validação). Fonte: ANA (2016) e INMET (2016)

Para o período de validação também foi gerado o mapa de espacialização das médias dos anuais de evapotranspiração da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, por sub-bacias (Figura 35).

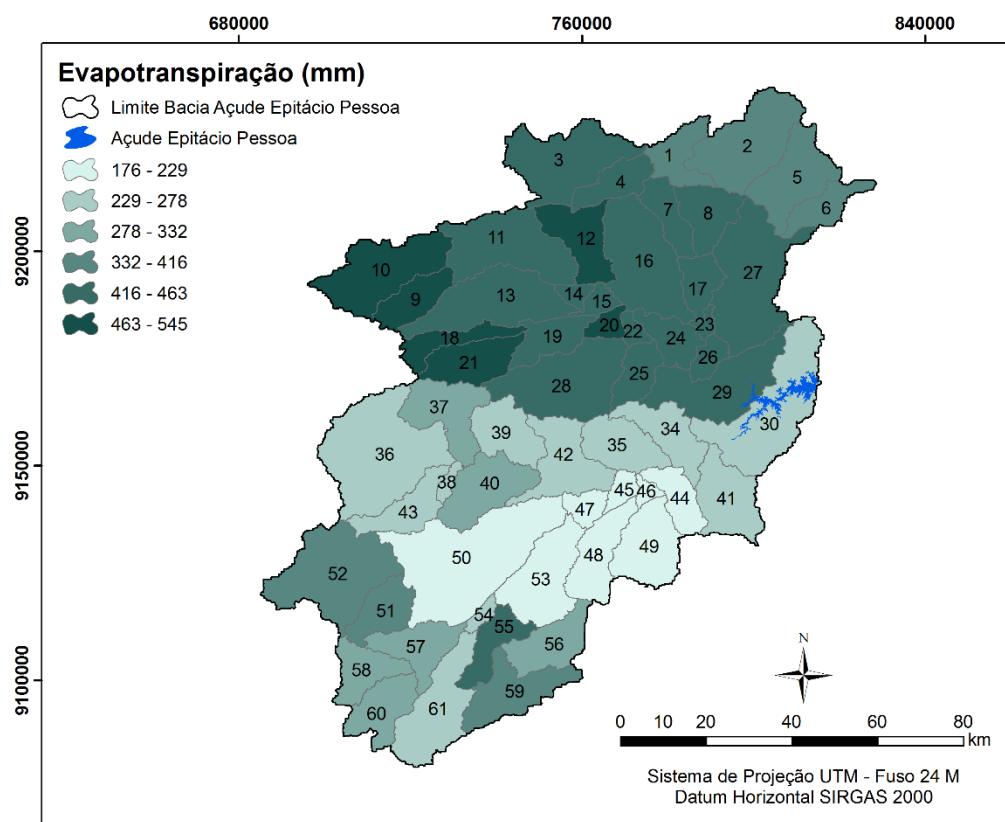


Figura 35 – Espacialização das médias anuais de evapotranspiração, por sub-bacia, para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, na fase de validação (1994 a 2014).

Observa-se, de acordo com a Figura 35 que a média de evapotranspiração real das sub-bacias foi de 358 mm, onde 55% das sub-bacias apresentaram valores maiores que a média e 45% das sub-bacias apresentaram valores inferiores à média. Mais uma vez, tal qual a Figura

31, observou-se que a área correspondente à bacia hidrográfica do Rio Taperoá apresentou valores maiores de evapotranspiração real com relação à bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba. Isto pode estar relacionado a variações nos dados de entrada, tendo em vista que a modelagem foi dividida em duas etapas.

5.5 Balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa

O balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa foi simulado utilizando o modelo SWAT e pôde ser visualizado por meio da ferramenta SWAT Check. A Tabela 20 expõe os valores das variáveis do balanço hídrico oriundos da simulação baseada no posto fluviométrico de Poço de Pedras e de Caraúbas. Através do cálculo da média aritmética desses valores, foram obtidos os valores das variáveis do balanço para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, que também estão disponíveis na Tabela 20 e representados esquematicamente na Figura 36.

Tabela 20 – Variáveis obtidas para o balanço hídrico na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa.

Variável (mm)	Alto Paraíba	Taperoá	Epitácio Pessoa
Precipitação	537,10	505,60	521,35
Evapotranspiração Real	277,90	428,70	353,30
Evapotranspiração Potencial	2855,2	2860,2	2857,70
Escoamento Superficial	31,29	23,39	27,34
Escoamento Subsuperficial	11,06	9,66	10,36
Percolação	219,28	43,77	131,53
Capilaridade	206,94	41,65	124,23
Descarga do Aquífero	1,62	0,00	0,81
Recarga ao Aquífero Profundo	10,92	2,12	6,52
Vazão	43,97	33,05	38,51
Fluxo de Base	12,68	9,66	11,17

Com base na Tabela 20 e na Figura 36, observa-se que a evapotranspiração real equivale a 68% do total de precipitação que chega à bacia; a percolação representa 25% deste total, porém, apenas 0,01% chega como recarga ao aquífero profundo. A vazão que chega ao rio representa 7% do total que precipita na bacia hidrográfica, destes 2% são de origem do fluxo de base e 5% do escoamento superficial.

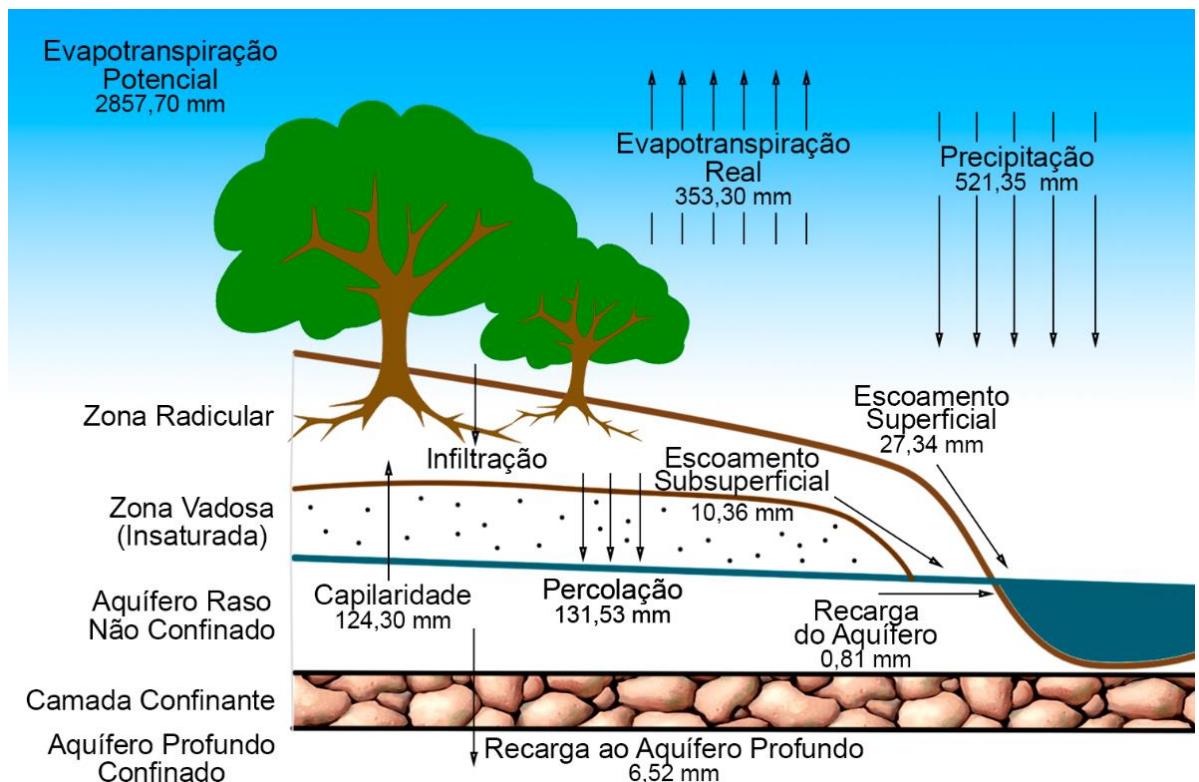


Figura 36 – Balanço hídrico da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa no período de 1970 a 1990. (Adaptado do SWAT Check).

Observa-se, ainda, de acordo com a Figura 36, que o valor obtido para Evapotranspiração Potencial foi bastante elevado, o que pode estar relacionado ao fato de que não foram inseridos valores observados de evapotranspiração na modelagem, sendo os valores dessa variável simulados pelo gerador climático do modelo SWAT, o que pode ter levado a superestimação dos mesmos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem espacial e temporal do balanço hídrico para a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa utilizando o modelo SWAT e a ferramenta SWAT-CUP para calibração automática obteve resultados satisfatórios. Inicialmente, antes da calibração automática do modelo, os valores dos indicadores estatísticos R^2 e NSE, com base na variável observada vazão, foram de 0,54 e 0,06, respectivamente, para o posto fluviométrico Poço de Pedras e de 0,23 e -8,56 para o posto Caraúbas. Após a calibração do modelo, estes valores foram melhorados, passando para valores de R^2 e NSE, respectivamente de 0,69 e 0,69 para o posto fluviométrico Poço de Pedras e 0,65 e 0,64 para o posto fluviométrico Caraúbas, o que mostrou que o modelo foi, de fato, calibrado, de acordo com os valores de referência pré-estabelecidos para estes indicadores estatísticos que eram de 0,6 para o R^2 e 0,5 para o NSE.

Embora o modelo tenha sido calibrado, este mostrou certa dificuldade em representar os picos de vazão, ora subestimando-os, ora superestimando-os. Tais fatos podem estar relacionados às particularidades físicas da bacia em estudo, por estar inserida num ambiente semiárido, onde quando há alta incidência de precipitação o volume dos rios (em sua maioria intermitentes) se eleva rapidamente. As divergências entre os hidrogramas observados e simulados podem estar relacionadas, também, a várias fontes de erros, ligados aos dados de entrada, por exemplo. E, também, deve-se considerar o fato de que não foram modelados os reservatórios existentes no perímetro da bacia hidrográfica, o que pode contribuir para essas divergências.

Por meio da ferramenta SWAT-CUP, foi possível, ainda, realizar-se a análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados neste estudo, onde encontrou-se que os parâmetros mais influentes na presente modelagem foram o GW_REVAP, o GWQMN, o GW_DELAY, o SOL_AWC, o SOL_Z, o CANMX, o CH_K2, o CN2 e o SLSUBBSN. Alguns destes parâmetros também foram encontrados como mais sensíveis em outros estudos realizados em regiões semelhantes à da área de estudo da presente pesquisa, o que deu coerência aos resultados encontrados, embora existam poucos trabalhos que abordem a metodologia desta pesquisa em regiões semiáridas.

A validação do modelo forneceu bons resultados, apresentando valores de R^2 e NSE de 0,87 e 0,8, respectivamente, para o posto fluviométrico Poço de Pedras e 0,56 e 0,41 para o posto fluviométrico Caraúbas. Os resultados para o posto Poço de Pedras estiveram dentro do estipulado como aceitável ($R^2 > 0,6$ e $NSE > 0,5$), entretanto os valores encontrados para o

posto fluviométrico Caraúbas, embora muito próximos ao aceitável, estiveram baixo do mínimo admissível.

A simulação do balanço hídrico pelo modelo SWAT possibilitou a visualização do comportamento hidrológico da bacia como um todo. Para sua visualização, foi utilizada a ferramenta SWAT Check, que lê os dados de saída do modelo SWAT e fornece os valores das componentes do balanço hídrico na forma de figura. De posse do balanço hídrico, constatou-se uma alta taxa de evapotranspiração na bacia, onde 68% do precipitado é evapotranspirado, o que já era de se esperar, devido às características climáticas da área de estudo e que do total precipitado, 7% é convertido em vazão, composta por 5% de origem do escoamento superficial e 2% de origem do fluxo de base.

Recomenda-se, para futuras pesquisas, que sejam incluídos na modelagem os reservatórios existentes nos limites da bacia hidrográfica estudada, bem como o próprio Açude Epitácio Pessoa, a fim de se obter resultados mais precisos e ainda mais consistentes acerca do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, evidenciada sua importância para a Paraíba, seja com relação à quantidade de municípios que dependem de suas águas para abastecimento humano, ou seja, pela importância econômica que desempenha como fonte hídrica para indústrias e agronegócio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI. M.; HAGHIGHAT, S. **SWATCUP calibration and uncertainty programs for SWAT**. In: Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation. p.1603-1609, 2007.
- ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 413-430, 2007.
- ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, pp. 103. 2012.
- AESA. Agência Executiva e de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado da Paraíba**. 2017. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>.
- ALVES DA SILVA, M. **Modelagem hidrológica e das perdas de solo: suas relações com as formas de relevo e uso do solo na bacia do rio Taperoá – PB**. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- ANA. Agencia Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – **Encarte Especial sobre a Crise Hídrica**. 2014. Disponível em <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. 2016. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/>>.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M.A.S.; AMORIM, J.R.A.; MENDONÇA, L.C.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, p 1091-1102. 2013.

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

ARNOLD, J. G., J. R. WILLIAMS; D. R. MAIDMENT. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. **Journal of Hydrology.** v. 121, n.2, p. 171-183. 1995.

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

ARNOLD, J.G.; MORIASI, D.N.; GASSMAN, P.W.; ABBASPOUR, K.C.; WHITE, M.J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R.D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M.W.; KANNAN, N.; JHA, M.K. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, **Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers.** v. 55, n. 4, p. 1491-1508. 2012.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos.** Editora Bertrand Brasil, 1988.

BELLON, E. **Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.** 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BELTRAME, A. DA V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 112 p., 1994.

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. 10, p. 363-374, 2005.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: The primer.** Chichester: JohnWiley & Sons Ltda. 1^a ed. 360p. 2001.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin des Sciences Hydrologiques.** n. 24. p. 43-69. 1979.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models – model calibration & uncertainty prediction, **Hydrological Processes**. v.6, n.3, p.279–298, 1992.

BONUMÁ, N.B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil.** 136 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

BRANDT, C.J. (1986) **Transformation of the kinetic energy of rainfall with variable tree canopies.** 446 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Universidade de Londres, Londres, 1986.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MEDIONDO, E. M. 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. 9-35, 2015.

BRIGHENTI, T. M. **Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT.** 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 21, n. 1, p. 53-64. 2016.

BRITO, F. B. **O Conflito Pelo Uso da Água do Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) – PB.** 208 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BROWN, L. C.; T. O. BARNWELL. **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual.** Environmental Research Laboratory. US EPA, EPA /600/3-87/007, Athens, GA, pp. 189. 1987.

CARVALHO NETO, J. G. **Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados Com o Modelo SWAT.** 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2011.

CARVALHO, O. **As secas e seus impactos.** In: CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. A Questão da Água no Nordeste. CGEE, Brasília – DF. 2012.

CASTRO, K.B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada.** 117 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

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

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos Avançados.** v. 63, n. 22, p. 61-82, 2008.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v. 13, n. 1, p.111-124, 2008.

DANTAS, J. C. **Processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Taperoá.** 84 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

DOOGE, J. C. **Linear theory of hydrologic systems.** n. 1468, U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D. C. 1973. (Boletim Técnico)

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de Informação de Solos Brasileiros.** 2015. Disponível em: <<http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>>.

FACCO, A. G. **Modelagem e simulação geoespacial da variação dos componentes do balanço hídrico para plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado na bacia do rio doce, Minas Gerais.** 89 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

FACCO, A. G; **Modelagem do Balanço Hídrico em Microbacia Hidrográfica com Plantio de Eucalipto.** 107 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2008.

FERREIRA DA SILVA, G. J. **Estimativa de Indicadores Biofísicos para Avaliação do Processo de desertificação no Município de São João do Cariri – PB.** 127 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

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

FERRIGO, S. Utilização do Modelo SWAT na Estimativa de Produção de Sedimentos na Bacia do Córrego Capão Comprido no Distrito Federal. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

FRAGOSO JÚNIOR., C.R., FERREIRA, T.F., MARQUES, D.M. Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos. São Paulo: Oficina Textos. 304p.2009.**GARBOSSA, L.H.P.; VASCONCELOS, L.R.C.; LAPA, K.R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010.** 2011 International SWAT Conference & Workshops, Toledo – Espanha, p. 27. 2011.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers.** v. 50, n. 4. p. 1211-1250, 2007.

GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. Recursos hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. 258 p.

GOMES, M.; RODRIGUES, R. Modelação hidrológica distribuída: aplicação à bacia do Guadiana. Congresso da Água, Lisboa, 1998.

GREEN, W. H. e AMPT, G. A. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. **The Journal of Agricultural Science.** v. 4, n1, p. 1-24, 1911.

GREGORY, I. N.; ELL, P. S. Historical GIS: Technologies, Methodologies and Scholarship. Cambridge University Express, pp. 241, 2007.

GUEDES, R. V. S.; Previsão de Seca na Bacia Hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa com Base em Redes Neurais Artificiais. 72 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

HARGREAVES, G.H. AND Z.A. SAMANI. Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 108, n.3, p. 225-230, 1982.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA)**. 2016. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>.

INSA. INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **O Semiárido Brasileiro Riquezas Diversidades e Saberes**. Campina Grande: INSA/MCTI, 2013.

INSA. INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas**. Campina Grande, PB: INSA, 2011. 440 p.

KEMANIAN, A. R.; JULICH, S.; MANORANJAN, V. S.; ARNOLD, J. G. Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model SWAT: Theory and model testing. **Ecological Modelling**. v. 222, n. 12, p. 1913-1921, 2011.

KENNEDY, J. E EBERHART, R.C. **Swarm Intelligence**. In. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. p.1942-1948, 1995.

KUCZERA, G.; PARENT, E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. **Journal of Hydrology**. v.211, n.1, p.69–85, 1998.

KUWAJIMA, J. I. **Análise do Modelo SWAT Como Ferramenta de Prevenção e de Estimativa de Assoreamento No Reservatório Do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LELIS, T.A. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2011.

LENHART. K.; ECKHARDT. N.; FOHRER; FREDE H.G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth**. v.27, p.645–654, 2002.

LIMA, R. C. S. A.; BURITI, C. O.; BEZERRA, H. A.; PATRÍCIO, M. C. M. **Abastecimento de água em Campina Grande (PB): um panorama histórico**. In: RANGEL JÚNIOR, A. G.; SOUSA, C. M. (Orgs.) Campina Grande Hoje e Amanhã. Campina Grande: EDUEPB, 2013. p. 17-29.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; DANTAS, M. S. M.; COSTA, A. R. F. C.; DUARTE, A. S.; SILVA, A. R. Atributos químicos de um Neossolo Regolítico distrófico em função das doses e tempos de aplicação de vinhaça. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 7, n. 3, p. 261-268, 2013.

LIMA, W. P.; **Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. 2008.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MEDARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1023-1031, 2006.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**. n. 27, 2008.

MARINHO, C. F. C. E; ALMEIDA, H. A. Principais Características Morfométricas do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. **Revista de Geografia (UFPE)**. v. 30, n. 2, 2013.

MCCUEN, R.H.; SNYDER, W.M. **Sensitivity analysis and Probabilistic Modeling**. In: MCCUEN, R.H.; SNYDER, W.M. Hydrologic modeling: statistical methods and applications. New York: Prentice Hall. 1986.

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, p. 239-245, 1979. MELO, H. A. **Integração Entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas: Uma Avaliação Metodológica**. 106

f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

MELO, H.A.; CUNHA, J.B.L.; NÓBREGA, R.L.B.; RUFINO; I.A.A.; GALVÃO, C.O. (2008). **Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG): Integração possível.** IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador: ABRH.

MI. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro.** Brasil. 2005.

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

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido.** In: GHYEI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O (Eds). Recursos hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, p. 2-27, 2012.

MOTA DA SILVA, J. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba.** 100 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NARSIMLU, B.; GOSAIN, A. K.; CHAHAR, B. R.; SINGH, S. K.; SRIVASTAVA, P. K. SWAT Model Calibration and Uncertainty Analysis for Streamflow Prediction in the Kunwari River Basin India, Using Sequential Uncertainty Fitting. **Environmental Processes.** v. 2, p. 79–95, 2015.

NASCIMENTO SILVA, M. L.; PORTELA, J. C.; SOBRINHO, F. E.; CAVALCANTE, J. S. J.; REBOUÇAS, C. A. M.; DIAS, N. S. Topossequência de Neossolos na zona rural de Florânia, Rio Grande do Norte. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido.** v. 10, n. 1, p. 22-32, 2014.

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

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005**. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 541 p. 2005.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2009**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 647p. 2011.

NOGUEIRA, P. C. P. **Aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Rio Camboriú para avaliação de seu uso como ferramenta de auxílio à gestão de recursos hídricos**. 110 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

NRCS. Natural Resources Conservation Service. **Chapter 7: Hydrologic Soil Groups**. In: NRCS. Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbooks Hydrology Chapters (Part 630). Washington, DC: USDA, 2009, p. 1-5.

OGBU, K. N.; MBAJIORGU, C. C. Evaluation of Impact of Land-Use Change in The Ebonyi River Watershed, South-Eastern Nigeria, Using Swat. **Journal of Agricultural Engineering and Technology (JAET)**. v. 21, n. 2, 2013.

PAES, J. L. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; FREIRE, M. B. G. S.; BARROS, M. F. C.; ROCHA, G. C. Dispersão de argilas em solos afetados por sais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 11, p. 1135-1142, 2013.

PARAÍBA. **Relatório Técnico – Levantamento Batimétrico Automatizado do Açude Epitácio Pessoa**. Campina Grande/PB: Agência Executiva de Gestão das (AES) / Governo do Estado da Paraíba. 2004.

PECHLIVANIDIS, I.G.; JACKSON, B.M.; MCINTYRE, N.R. WHEATER, H.S. Catchment Scale Hydrological Modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. **Global NEST Journal**, v. 13, p. 193-214, 2011.

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

PRIESTLEY, C.H.B. AND R.J. TAYLOR. (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**. v. 100, p. 81- 92, 1972.

QIAO, L.; HERRMANN, R. B.; PAN, Z. Parameter uncertainty reduction for swat using grace, streamflow, and groundwater table data for lower Missouri river basin. **Journal of the American Water Resources Association**. v.49, n.2, p.343-358, 2013.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of Soil Water Properties. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v. 25, n. 5, p. 1316-1328, 1982.

RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; VIEIRA, Z. M. C. L.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; SOUZA, J. A. **Atribuições e Responsabilidades na Gestão dos Recursos Hídricos – O Caso do Açude Epitácio Pessoa/Boqueirão no Cariri Paraibano**. In Anais do XX Simpósio Brasileiro e Recursos Hídricos. Bento Gonçalves – RS. 2013.

RODRIGUES, L. E.; ELMIRO, M. A. T.; JACOBI, C. M.; LAMOUNIER, W. L. 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. **Sociedade & Natureza**. v. 27, n. 3, p. 485-500, 2015.

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

SALIMI, E. T.; NOHEGAR, A.; MALEKIAN, A.; HOSSEINI, M.; HOLISAZ, A. Runoff simulation using SWAT model and SUFI-2 algorithm (Case study: Shafaroud watershed, Guilan Province, Iran). **Caspian Journal of Environmental Sciences**. v. 14, n. 1, p. 69-80, 2016.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV: A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 174-181, 1967.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. V: Relationships between particle-size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available-water. **Journal of Soil Science**, v. 20, n. 1, p. 126-131, 1969.

SANTHI, C.; ARNOLD, J.G.; WILLIANS, J.R.; DUGAS, W.A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L.M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**. Vol. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001.

SANTOS, A. N. **Rendimento e avaliação nutricional do cultivo hidropônico de alface (*Lactuca sativa L.*) em sistema NFT no semiárido brasileiro utilizando águas salobras.** 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

SANTOS, J. Y. G. **Implicações das mudanças do clima e uso do solo nos processos hidrossedimentológicos da bacia do rio Tapacurá.** 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

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

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1569-1578, 2006.

SERGIO, D. Z. **Modelagem hidrológica da bacia do Rio Cubatão do Sul com modelo SWAT.** 120 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SILVA JÚNIOR, W. R. **Estudo do Estado Trófico em Reservatório Público de Uso Smúltiplos em Região do Semiárido Nordestino Utilizando a Técnica de Modelagem Computacional Como Ferramenta de Gerenciamento da Qualidade da Água.** 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SILVA, J, B, G.; MARTINEZ, M, A.; PIRES, C, S.; ANDRADE, I, P, S.; SILVA, G, T, Avaliação da condutividade elétrica e pH da solução do solo em uma área fertirrigada com água resíduária de bovinocultura de leite. **Irriga**, Edição Especial, p. 250-263, 2012.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; SILVA, L. P. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 185, n. 8, p. 8977-8990, 2013.

SILVA, R. M.; SILVA, L. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão de precipitação na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, p. 357-372, 2010.

SILVA, V.C.L.; SILVA, L.P.; SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. **Delimitação automatizada e aplicação do modelo AVSWAT para a Bacia do Rio Mamuaba**, XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, ABRH, p. 1-17, 2011.

SLOAN, P.G.; MORRE, I.D.; COLTHARP, G.B.; EIGEL, J.D. **Modeling surface and subsurface storm flow on steeply-sloping forest watersheds**. Water Resources Inst. Report 142. Univ. Kentucky, Lexington. 1983.

SMITH, M. (1991). **Report on the expert consultations on revision of FAO methodologies for crop water requerimentes**. Rome: FAO, 45p.

SOROOSHIAN, S. AND V.K. GUPTA, "Model Calibration," **Chapter 2 of Computer Models of Watershed Hydrology**, Edited by V.J. Singh, *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, Colorado, pp. 2368, 1995.

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

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do Cariri Paraibano. **Mercator**, v. 8, n. 16, p. 217-232, 2009.

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

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **As secas no Nordeste**. SUDENE, Recife, Brasil. 1981.

TSVETSINSKAYA, E. A.; SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; DICKINSON, R. E.; ZENG, X.; LUCHT, W. Relating MODIS-derived surface albedo to soils and rock types over Northern Africa and the Arabian peninsula. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 9, p. 67-1-67-4, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido.** Modelos Hidrológicos. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 679, 2005.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v.324, p.10–23, 2006.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Recife: 2006. Versão Digital, 443p.

VIEIRA, V. P. P. B. (1999). **Água doce no Semi-Árido.** In: Águas doces no Brasil. IEA/USP, Academia Brasileira de Ciências, São Paulo, Brasil.

WHITE, M. J., R. D. HARMEL, J. G. ARNOLD, AND J. R. WILLIAMS. 2012. SWAT Check: A screening tool to assist users in the identification of potential model application problems. **Journal of Environmental Quality (in press).** Available at: <http://swatmodel.tamu.edu/software/swat-check>.

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor,** In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. Washington D.C.: USDA, 1975, p. 244–252.

WILLIAMS, J.; NICKS, A.; ARNOLD, J. Simulator for Water Resources in Rural Basins. **Journal of Hydraulic Engineering.** v. 111, n. 6, 1985.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual.** Rep. No. ARS-77, USDA, Washington, D.C. 1990.

YAN, B.; FANG, N. F.; ZHANG, P. C.; SHI, Z. H. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. **Journal of Hydrology.** v. 484, p. 26-37, 2013.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K. C.; XIA, J.; YANG, H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**. v.358, p. 1-23, 2008.

APÊNDICE

Descrição do Apêndice A

Apêndice A: Valores dos parâmetros para os tipos de solo usados na modelagem

SNAM	CAM*	LAT*	LUV*	NEO_F*	NEO_L*	NEO_R*	PLA*	VER*	ARG*
NLAYERS	5	5	5	9	2	3	3	4	3
HYDGRP	B	C	B	B	B	A	B	C	B
SOL_ZMX	1550	2000	850	1550	500	1500	700	900	50
ANION_EXCL	0,453	0,430	0,464	0,453	0,437	0,437	0,453	0,398	0,398
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SOL_Z1	15	11	140	50	250	80	170	40	12
SOL_BD1	1,63	1,61	1,54	1,59	1,59	1,69	1,61	1,59	1,47
SOL_AWC1	0,175	0,150	0,183	0,158	0,158	0,15	0,175	0,150	0,175
SOL_K1	25,9	4,3	2,3	61,1	61,1	210	25,9	4,3	25,9
SOL_CBN1	6,6	7,4	23,3	2	4,7	9,3	7,2	15,3	5,8
CLAY1	16	29	33	6	5	2	9	28	10
SILT1	18	6	26	12	15	13	13	19	16
SAND1	66	65	41	82	80	85	78	53	74
ROCK1	2	1	71	2	6	2	17	15	26
SOL_ALB1	0,227	0,231	0,196	0,306	0,302	0,384	0,346	0,220	0,196
USLE_K1	0,12102	0,08665	0,11737	0,09554	0,10520	0,08894	0,10472	0,11412	0,12
SOL_EC1	0,23	5,2	0,25	5,65	0,44	0,52	0,40	0,24	3,03
SOL_Z2	420	350	220	140	500	850	500	250	25
SOL_BD2	1,63	1,58	1,38	1,56	1,59	1,55	1,61	1,51	1,49
SOL_AWC2	0,175	0,142	0,175	0,15	0,158	0,15	0,150	0,142	0,15
SOL_K2	25,9	1,2	0,6	210	61,1	210	4,3	1,2	1,5
SOL_CBN2	3,9	5,2	13,6	2	22	0,9	5,8	6,5	3,3
CLAY2	16	34	52	6	6	2	26	40	24
SILT2	20	7	14	2	14	12	13	14	17
SAND2	64	59	34	92	80	86	61	46	59
ROCK2	2	1	5	12	3	2	5	1	20
SOL_ALB2	0,227	0,231	0,196	0,306	0,302	0,384	0,346	0,220	0,196
USLE_K2	0,12374	0,08775	0,09428	0,04715	0,10304	0,10625	0,10693	0,10001	0,11
SOL_EC2	0,23	5,2	0,25	5,65	0,44	0,52	0,40	0,24	3,03
SOL_Z3	1000	950	460	330	0	1500	700	650	50
SOL_BD3	1,63	1,47	1,35	1,55	0	1,55	1,62	1,51	1,48
SOL_AWC3	0,175	0,142	0,175	0,183	0	0,15	0,150	0,183	0,15
SOL_K3	25,9	1,2	0,6	2,3	0	210	4,3	2,3	1,5
SOL_CBN3	2,2	3,9	9,9	4,6	0	0,7	2,3	5,1	2,4
CLAY3	16	47	54	31	0	2	22	39	31
SILT3	19	7	16	29	0	12	14	17	16
SAND3	65	46	30	40	0	86	64	44	53
ROCK3	2	2	8	0	0	2	1	2	36
SOL_ALB3	0,227	0,231	0,196	0,306	0	0,384	0,346	0,220	0,196
USLE_K3	0,12358	0,08124	0,09656	0,12072	0	0,10961	0,11192	0,10488	0,11
SOL_EC3	0,23	5,2	0,25	5,65	0	0,52	0,40	0,24	3,03
SOL_Z4	1450	1480	700	500	0	0	0	900	0
SOL_BD4	1,63	1,44	1,47	1,52	0	0	0	1,58	0
SOL_AWC4	0,175	0,175	0,183	0,183	0	0	0	0,150	0
SOL_K4	25,9	0,6	2,3	2,3	0	0	0	4,3	0
SOL_CBN4	2	2,5	3,7	2,4	0	0	0	3,2	0
CLAY4	16	48	40	33	0	0	0	31	0
SILT4	21	10	25	33	0	0	0	16	0
SAND4	63	42	35	34	0	0	0	53	0
ROCK4	2	2	3	0	0	0	0	6	0

SNAM	CAM*	LAT*	LUV*	NEO_F*	NEO_L*	NEO_R*	PLA*	VER*	ARG*
SOL_ALB4	0,227	0,231	0,196	0,306	0	0	0	0,220	0
USLE_K4	0,12713	0,08882	0,11282	0,12295	0	0	0	0,10842	0
SOL_EC4	0,23	5,2	0,25	5,65	0	0	0	0,24	0
SOL_Z5	1550	2000	850	850	0	0	0	0	0
SOL_BD5	1,63	1,32	1,61	1,64	0	0	0	0	0
SOL_AWC5	0,175	0,175	0,175	0,158	0	0	0	0	0
SOL_K5	25,9	0,6	25,9	61,1	0	0	0	0	0
SOL_CBN5	2,4	3,1	2,1	3,1	0	0	0	0	0
CLAY5	12	59	17	11	0	0	0	0	0
SILT5	27	8	23	8	0	0	0	0	0
SAND5	61	33	60	81	0	0	0	0	0
ROCK5	2	3	3	1	0	0	0	0	0
SOL_ALB5	0,227	0,231	0,196	0,306	0	0	0	0	0
USLE_K5	0,13378	0,07937	0,12251	0,08521	0	0	0	0	0
SOL_EC5	0,23	5,2	0,25	5,65	0	0	0	0	0
SOL_Z6	0	0	0	1050	0	0	0	0	0
SOL_BD6	0	0	0	1,61	0	0	0	0	0
SOL_AWC6	0	0	0	0,158	0	0	0	0	0
SOL_K6	0	0	0	61,1	0	0	0	0	0
SOL_CBN6	0	0	0	2	0	0	0	0	0
CLAY6	0	0	0	11	0	0	0	0	0
SILT6	0	0	0	8	0	0	0	0	0
SAND6	0	0	0	81	0	0	0	0	0
ROCK6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB6	0	0	0	0,306	0	0	0	0	0
USLE_K6	0	0	0	0,08669	0	0	0	0	0
SOL_EC6	0	0	0	5,65	0	0	0	0	0
SOL_Z7	0	0	0	1150	0	0	0	0	0
SOL_BD7	0	0	0	1,63	0	0	0	0	0
SOL_AWC7	0	0	0	0,175	0	0	0	0	0
SOL_K7	0	0	0	25,9	0	0	0	0	0
SOL_CBN7	0	0	0	1,9	0	0	0	0	0
CLAY7	0	0	0	17	0	0	0	0	0
SILT7	0	0	0	12	0	0	0	0	0
SAND7	0	0	0	71	0	0	0	0	0
ROCK7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB7	0	0	0	0,306	0	0	0	0	0
USLE_K7	0	0	0	0,11089	0	0	0	0	0
SOL_EC7	0	0	0	5,65	0	0	0	0	0
SOL_Z8	0	0	0	1300	0	0	0	0	0
SOL_BD8	0	0	0	1,62	0	0	0	0	0
SOL_AWC8	0	0	0	0,175	0	0	0	0	0
SOL_K8	0	0	0	25,9	0	0	0	0	0
SOL_CBN8	0	0	0	1,8	0	0	0	0	0
CLAY8	0	0	0	14	0	0	0	0	0
SILT8	0	0	0	5	0	0	0	0	0
SAND8	0	0	0	81	0	0	0	0	0
ROCK8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB8	0	0	0	0,306	0	0	0	0	0
USLE_K8	0	0	0	0,07648	0	0	0	0	0
SOL_EC8	0	0	0	5,65	0	0	0	0	0
SOL_Z9	0	0	0	1550	0	0	0	0	0

SNAM	CAM*	LAT*	LUV*	NEO_F*	NEO_L*	NEO_R*	PLA*	VER*	ARG*
SOL_BD9	0	0	0	1,67	0	0	0	0	0
SOL_AWC9	0	0	0	0,15	0	0	0	0	0
SOL_K9	0	0	0	210	0	0	0	0	0
SOL_CBN9	0	0	0	0,8	0	0	0	0	0
CLAY9	0	0	0	6	0	0	0	0	0
SILT9	0	0	0	1	0	0	0	0	0
SAND9	0	0	0	93	0	0	0	0	0
ROCK9	0	0	0	8	0	0	0	0	0
SOL_ALB9	0	0	0	0,306	0	0	0	0	0
USLE_K9	0	0	0	0,04872	0	0	0	0	0
SOL_EC9	0	0	0	5,65	0	0	0	0	0

* CAM = Cambissolo; LAT = Latossolo; LUV = Luvissolo; NEO_F = Neossolo Flúvico; NEO_L = Neossolo Litólico; NEO_R = Neossolo Regolítico; PLA = Planossolo; VER = Vertissolo; ARG = Argissolo.