



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO

**CRISE HÍDRICA NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CAMPINA
GRANDE: ANÁLISE DE CENÁRIOS FUTUROS NO VOLUME DE
ÁGUA DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA ENTRE 2020 E
2030**

Por

Jorge Flávio Casé B. C. Silva

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO

Jorge Flávio Casé B. C. Silva

**CRISE HÍDRICA NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CAMPINA
GRANDE: ANÁLISE DE CENÁRIOS FUTUROS NO VOLUME DE
ÁGUA DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA ENTRE 2020 E
2030**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586c Silva, Jorge Flávio Casé Braga da Costa.

Crise hídrica no abastecimento de água em Campina Grande: Análise de cenários futuros no volume de água do reservatório Epitácio Pessoa entre 2020 e 2030. / Jorge Flávio Casé Braga da Costa Silva. - João Pessoa, 2019.

122 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva Silva.

Coorientação: Celso Augusto Guimarães Santos Santos.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Modelagem. 2. Sistemas de Informação Geográfica. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Volume de Água. 5. Cenários Futuros. I. Silva, Richarde Marques da Silva. II. Santos, Celso Augusto Guimarães Santos. III. Título.

UFPB/BC

“Crise Hídrica no Abastecimento de Água em Campina Grande: Análise de Cenários Futuros no Volume de Água no Reservatório Epitácio Pessoa entre 2020 e 2030”

por

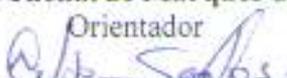
Jorge Flávio Casé Braga da Costa Silva

Tese apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do CCEN-UFPB, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geografia.

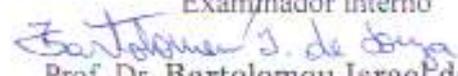
Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente

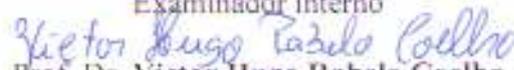
Aprovada por:

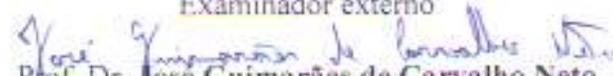

Prof. Dr. Richarde Marques da Silva
Orientador


Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos
Co-orientador


Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima
Examinador interno


Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza
Examinador interno


Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho
Examinador externo


Prof. Dr. José Guimarães de Carvalho Neto
Examinador externo

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Curso de Doutorado em Geografia

Março/2019

Dedico aos que fisicamente não estão entre nós

AGRADECIMENTOS

Durante o processo de seleção de doutorado me disseram que seria uma tarefa muito difícil de concluir, que o doutorado é um trabalho solitário e desgastante. Fiquei preocupado com estas afirmações, porém, agora na etapa de finalização relembro disso e vejo que foi totalmente diferente, houve momentos desgastantes, foram muitos, mas sempre acompanhados de muitos amigos e pessoas que vinham para apoiar, incentivar e sobretudo, ajudar.

Foram muitas pessoas, algumas que eu nem conhecia, mas que se tornaram amigos que gostaria de manter para sempre, vou destacar alguns aqui.

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, D. Fátima (minha Mãe), Sr. Cazé (meu Pai – saudades), Danilo, Saulo e Denise (meus Irmãos), cunhados(as), sobrinhos, avó, tios(as), primos(as) e em especial à minha esposa Valéria Raquel, mulher extremamente forte, competente e focada, que sempre me apoia e “empurra” para atingir novos patamares acadêmicos, profissionais e pessoais, e que me deu o melhor presente da minha vida, minha filha, Dulce Maria que é minha fonte de tranquilidade e força para correr atrás e atingir meus sonhos e objetivos.

Se a família ajudou, os amigos foram essenciais para a concretização do trabalho, pessoas como Franklin Linhares, João Filadelfo e Leonardo Pereira, que trouxeram preciosas contribuições provenientes do “arcabouço teórico metodológico” juntamente com Richarde e Alexandro nos momentos mais divertidos e descontraídos desta pesquisa.

Quero agradecer muito, muito mesmo ao meu amigo o Prof. Dr. Richarde Marques da Silva, que com suas orientações durante os “cafezinhos” e até mesmo nos momentos não acadêmicos, sempre fez colocações, discutiu e fez sugestões essenciais para a pesquisa. Richarde muito obrigado mesmo.

O meu co-orientador, Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos, outro grande amigo que vem tendo paciência e me ajudado desde a orientação no mestrado, muito obrigado Celso.

Não posso deixar de agradecer a outro grande amigo, parceiro e co-orientador (quase oficial), Alexandro Medeiros da Silva, que contribuiu tanto quanto Richarde e Celso, obrigado ainda é pouco para compensar os momentos em que solicitei sua ajuda.

Meu muito obrigado também para a banca avaliadora desta pesquisa, Prof. Dr. Eduardo Rodrigues de Viana de Lima, meu orientador durante a graduação, símbolo de paciência e dedicação, Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza, mais uma vez avaliando e contribuindo com o meu desenvolvimento, Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho, personalidade que acompanho e admiro desde o seu ingresso na Geografia e ao Prof. Dr. José Guimarães de Carvalho Neto, que conheci há pouco tempo e que mesmo indiretamente já ajudou na construção do pensamento desenvolvido nesta pesquisa.

Agradeço também à UFPB, ao Departamento de Geografia e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia pela disponibilização para a concretização da pesquisa. Agradeço ao Laboratório de Ensino, Pesquisa e Projetos em Análise Espacial – LEPPAN em nome de todos os alunos que já passaram por ali dos que ali estão e dos que virão, esse laboratório fez e sempre fará parte da minha carreira acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo auxílio financeiro, essencial para a pesquisa.

Não posso esquecer do Prof. Dr. Pedro Costa Guedes Vianna, meu primeiro “desorientador”, que me apresentou a cartografia, a navegação marinha, que me deu a oportunidade de ingressar no doutorado e desde os primeiros anos da graduação construímos uma amizade verdadeira.

Por fim, dedico este trabalho às pessoas que compartilham felicidade, simplicidade e humildade, se cheguei até aqui é porque tento sempre espalhar estas qualidades, e afirmo que melhor do que ter dinheiro e poder, é ter amigos, paz e tranquilidade.

Obrigado.

RESUMO

Campina Grande vem sofrendo com o abastecimento de água desde 2012, com severos problemas decorrentes de reduções da chuva, delineando um cenário complexo de escassez hídrica. Assim, o objetivo deste estudo foi analisar os impactos futuros no volume do reservatório Epitácio Pessoa, com base na variabilidade da precipitação, crescimento populacional e mudanças recentes no uso e ocupação do solo. Estando baseado na hipótese de que a disponibilidade hídrica do reservatório não atenderá a demanda da população de Campina Grande e demais cidades abastecidas pelo reservatório, mesmo com a transposição das águas do Rio São Francisco. Para alcançar o objetivo do estudo foram utilizadas técnicas estatísticas, de Sensoriamento Remoto e modelagem hidrológica, além de: (a) séries históricas de precipitação, (d) tipos de solo, (c) uso e cobertura do solo, (d) declividade, e (e) dados demográficos. Foram realizados diversos procedimentos metodológicos, a saber: (a) testes não paramétricos de Mann-Kendall e Sen, (b) teste de Pettitt, (c) simulação de cenários de uso do solo utilizando o algoritmo LCM, (d) simulação de cenários futuros de chuva para o período de 2020 a 2030, (e) calibração e validação do modelo SWAT para o período de 1963 a 1991, (f) predição do volume do reservatório. Os resultados dos testes de Mann-Kendall, Sen e Pettitt apontaram a não existência de tendências de precipitação significativas na área de estudo, porém, eles mostram uma significativa diminuição da precipitação entre 1963 e 1991. Os resultados da calibração e validação do SWAT foram considerados satisfatórios pelos índices R^2 , Nash e PBIAS. A partir da série de precipitação, foi selecionado um período de 10 anos (1981 a 1991), onde foram aplicadas reduções nos volumes precipitados (-40%, -45% e -50%). Em seguida, os resultados foram assumidos como cenários de precipitação para o período de 2020 a 2030, juntamente com o cenário de uso do solo para o ano de 2030, gerando as vazões estimadas para o período de 2020 a 2030, incluindo a vazão estimada para a transposição do Rio São Francisco. Os resultados comprovam a veracidade da hipótese levantada neste estudo, pois nos três cenários de precipitação adotados, o reservatório atinge seu volume morto já nos dois primeiros anos do período analisado, retornando a acumular volume até o ano de 2024 e posteriormente voltando a perder volume, atingindo o volume morto no ano de 2030.

Palavras-chave: Modelagem, SIG, Sensoriamento Remoto, Cenários Futuros, Volume de Água.

ABSTRACT

The water supply in Campina Grande has been suffering since 2012 with severe occurrences due to rain reduction, delineating a complex scenario of water scarcity. Thus, the objective of this study was to analyze future impacts on the Epitácio Pessoa reservoir volume, based on rainfall variability, population growth and recent changes in the land use and cover. This objective was based on the hypothesis that the water availability of the reservoir will not meet the demand of the population supplied by the reservoir, even with the transposition of the waters of the São Francisco river. In order to reach the objective of the study, several techniques of Geographic Information Systems, Remote Sensing and hydrological modeling were used, besides historical time series such as: (a) rainfall, (d) soil types, (c) land use and cover, d) land slope, and (e) demographic data. Several methodological procedures were performed: (a) non-parametric Mann-Kendall and Sen tests, (b) Pettitt's test, (c) simulation of land use and cover scenarios using the LCM algorithm, (d) simulation of future rainfall scenarios for the period from 2020 to 2030, (e) calibration and validation of the SWAT model for the period 1963 to 1991, and (f) prediction of reservoir volume. The results indicated that there were no significant rainfall trends in the study area, however, they showed a significant decrease in rainfall between 1963 and 1991. The SWAT calibration and validation results were considered satisfactory based on R^2 , Nash, and PBIAS. As for the rainfall time series, a period of 10 years (1981 to 1991) was selected, in which reductions were applied in the monthly volumes (-40%, -45% and -50%). Then, the results were assumed as rainfall scenarios for the period from 2020 to 2030, together with the land use and cover scenario for 2030, including the estimated outflow for the transposition of the São Francisco river. The results confirm the veracity of the hypothesis in this study since in the three rainfall scenarios adopted, the reservoir reaches its critical volume in the first two years of the analyzed period, returning to increase the reservoir volume until 2024 and subsequently returns to critical volume, reaching the critical volume 2030.

Keywords: Modeling, GIS, Remote Sensing, Future Scenarios, Water Volume.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Hipótese	17
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo geral.....	18
2.2. Objetivos específicos	18
3. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA.....	19
3.1. A bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba.....	20
3.2. A bacia hidrográfica do Rio Taperoá.....	21
4. O RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA	21
5. ESTRUTURA DA TESE.....	22
CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
1. A PAISAGEM COMO CATEGORIA DE ANÁLISE.....	24
2. O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	26
3. DISPONIBILIDADE HÍDRICA	29
4. HISTÓRICO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CAMPINA GRANDE	30
5. O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO (PISF) NO EIXO LESTE	35
6. PROJEÇÕES POPULACIONAIS.....	39
CAPÍTULO III - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	42
1. PROJETANDO O AUMENTO DA POPULAÇÃO ENTRE 2020 E 2030.....	42
2. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE USO DO SOLO	43
2.1. Geração de Imagens Classificadas e Predição da Mudança do Uso e Ocupação do Solo pelo Land Change Modeler (LCM).....	45
2.2. Previsão do potencial de transição	47
2.3. Análise da mudança na cobertura do solo e definição das transições.....	48

2.4. Teste e seleção das variáveis explanatórias	48
3. AQUISIÇÃO, TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO	50
3.1. Tratamento dos dados	50
3.2. Análise espacial da precipitação	53
4. TENDÊNCIAS DA PRECIPITAÇÃO E VARIABILIDADE CLIMÁTICA.....	55
5. MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	59
5.1. O Modelo SWAT	60
5.1.1. Caracterização do modelo SWAT.....	62
5.1.2. Escoamento superficial	63
5.1.3. Evapotranspiração	65
5.1.3.1. Evapotranspiração potencial	65
5.1.3.2. Evapotranspiração real	66
5.1.4. Percolação	68
5.1.5. Água subterrânea.....	70
5.2. Geração do banco de dados do modelo	72
5.3. Calibração automática do modelo SWAT com o SWAT-CUP	79
5.4. Análise estatística de desempenho do modelo SWAT	81
5.5. Simulação do volume futuro do reservatório Epitácio Pessoa.....	82
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
1. PROJEÇÕES POPULACIONAIS PARA OS ANOS DE 2020 A 2030.....	84
2. CENÁRIOS FUTUROS DE USO DO SOLO.....	86
3. ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL, TENDÊNCIAS E PROJEÇÕES DA PRECIPITAÇÃO	91
3.1. Análise espaço-temporal da precipitação.....	91
3.2. Tendências da precipitação	93
3.3. Projeções futuras da precipitação para o período de 2020 a 2030.....	97

4. MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	98
4.1. Calibração, validação e análise estatística de desempenho do modelo SWAT	98
4.2. Modelagem da vazão projetada	100
4.3. Análise do volume observado no reservatório Epitácio Pessoa.....	101
4.4. Análise da transposição do Rio São Francisco para o reservatório Epitácio Pessoa	103
4.5. Simulação futura do volume armazenado no reservatório Epitácio Pessoa	104
CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	109
REFERÊNCIAS	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa.	19
Figura 2 - Resumo ilustrativo da pesquisa.....	23
Figura 3 – Distribuição do Semiárido no território brasileiro.	26
Figura 4 – Localização dos Eixos do Projeto de Integração do rio São Francisco.....	37
Figura 5 – Percurso do Eixo Leste. Adaptado de ANA (2005).	38
Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.	42
Figura 7 – Procedimentos metodológicos utilizados na predição dos cenários de uso do solo.	45
Figura 8 – Metodologia para predição do uso e ocupação do solo para t4 (2030) para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa usando o LCM do Idrisi TerrSet.	47
Figura 9 – <i>Boxplot</i> dos postos pluviométricos utilizados neste estudo.	52
Figura 10 – Dendograma de similaridade entre os dados dos postos pluviométricos.	52
Figura 11 - Postos pluviométricos e fluviométricos utilizados.	53
Figura 12 – Diagrama sintético das etapas que constituem o modelo SWAT.	62
Figura 13 – Distribuição da demanda evaporativa do solo em profundidade.	68
Figura 14 – Sub-bacias e altimetria da bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa.	73
Figura 15 – Uso do solo na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.	75
Figura 16 – Tipos de solos existentes na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.	76
Figura 17 – Rede de drenagem e classes de declividade para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa.	78
Figura 18 – Projeções populacionais com o total dos habitantes residentes nos municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa.	86
Figura 19 – Mapas de uso do solo para da bacia do reservatório Epitácio Pessoa: (a) 2000, (b) 2010, e (c) 2015.	88
Figura 20 – Uso do solo na bacia do reservatório Epitácio Pessoa para o ano de 2030.....	90

Figura 21 – Distribuição da precipitação média anual na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.	91
Figura 22 – Anomalia da precipitação média na bacia do reservatório Epitácio Pessoa. ...	93
Figura 23 – Distribuição temporal da precipitação anual, declividade de Sen e teste de Pettitt.	96
Figura 24 – Distribuição temporal das precipitações projetadas com redução de 40% (P40%), 45% (P45%), e 50% (P50%).	98
Figura 25 - Resultados da calibração e validação da vazão para o posto Caraúbas.	99
Figura 26 - Resultados da calibração e validação da vazão para o posto Poço de Pedras.	100
Figura 27 - Distribuição temporal das vazões afluentes no reservatório Epitácio Pessoa que foram projetadas com redução de 40% (V40%), 45% (V45%), e 50% (V50%).	101
Figura 28 – Volumes mensais observados do reservatório Epitácio Pessoa.	102
Figura 29 – Série de vazão do posto pluviométrico PISF Monteiro.	104
Figura 30 – Cenários de volume armazenado no reservatório Epitácio Pessoa no período entre 2020 e 2030.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localidades atendidas pelo sistema de abastecimento de Campina Grande.	33
Tabela 2 - Postos pluviométricos selecionados após análise inicial de consistência dos dados	52
Tabela 3 - Área e percentual de uso do solo na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.	74
Tabela 4 - Informações básicas dos solos presentes na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.	77
Tabela 5 - Postos climatológicos utilizados neste estudo.....	79
Tabela 6 - Descrição dos parâmetros calibrados automaticamente pelo SWAT-CUP.....	80
Tabela 7 - Total de habitantes por município inserido na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.	84
Tabela 8 - Resultados das projeções populacionais utilizando o método projeção aritmético	85
Tabela 9 - Resultados das projeções populacionais utilizando o método projeção geométrica.	85
Tabela 10 - Resultados das projeções populacionais utilizando o método projeção dos mínimos quadrados.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11 - Área dos tipos de uso do solo na bacia.....	87
Tabela 12 - Resultado da comparação entre a cobertura do solo estimada e a observada para o ano de 2015.....	89
Tabela 13 - Precipitações mínima, máxima, média e desvio padrão anuais dos postos pluviométricos da bacia do reservatório Epitácio Pessoa.....	92
Tabela 14 - Resultados dos testes de Mann-Kendall e Sen para os postos pluviométricos da área de estudo.	94
Tabela 15 - Resultados dos testes de Pettitt para os postos pluviométricos da área de estudo.	95
Tabela 16 - Média, desvio médio e desvio padrão das precipitações observada e projetadas.	97

Tabela 17 - Análise estatística dos resultados da calibração e validação do modelo.....	99
Tabela 18 - Análise estatística dos resultados da calibração e validação do modelo.....	100
Tabela 19 - Vazão média mensal projetada afluyente no reservatório Epitácio Pessoa.....	101
Tabela 20 - Valores de referência para o abastecimento humano adotados pela CAGEPA.	105
Tabela 21 - Consumo mensal projetado para o reservatório Epitácio Pessoa de 2020 a 2030	105
Tabela 22 - Evaporação média do tanque Classe A, segundo Oliveira et al. (2005).	106

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1. INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil é uma das zonas semiáridas do mundo, onde o abastecimento de água se tornou uma grande preocupação. O semiárido brasileiro sempre enfrentou períodos de secas ao longo dos últimos séculos, decorrentes da má distribuição espacial da precipitação, da geologia e dos tipos de solo da região, havendo dessa forma uma necessidade premente de racionalização do uso dos recursos hídricos e de políticas públicas para atenuar as causas das secas no abastecimento de água para o consumo humano (REBOUÇAS, 1997).

Problemas decorrentes das secas e da escassez hídrica são cada vez mais recorrentes no cotidiano de grande parte da porção semiárida da região Nordeste do Brasil, pois atingem toda a sociedade, prejudicando o desenvolvimento econômico e social (ARAÚJO et al., 2012; GUERRA, 1981; ROSADO e MORAIS, 2010). O problema da escassez hídrica prejudica a população de regiões semiáridas devido à irregularidade das chuvas e ao problema no armazenamento de água nas grandes, médias e pequenas cidades no semiárido, além das altas taxas de evaporação e do aumento da demanda de água pela população.

Assim, estudos sobre previsão do volume de reservatórios utilizando modelagem hidrológica, Sistemas de Informações Geográficas e técnicas de sensoriamento remoto de maneira integrada, são primordiais para o gerenciamento dos recursos hídricos de regiões susceptíveis a variabilidade climática que sofrem com a crise hídrica no abastecimento de água, como é o caso do reservatório Epitácio Pessoa localizado no Estado da Paraíba.

Os fatores que contribuem para esse cenário de seca e escassez hídrica são a variação climática e o aumento da demanda per capita por água, que são agravados por problemas de gerenciamento dos recursos hídricos, uso excessivo da água, modificações do uso do solo, estímulo à urbanização e industrialização em áreas que já enfrentam problemas de escassez hídrica (REBOUÇAS, 1997). Pode-se destacar ainda que, a avaliação desses problemas em uma determinada área deve abranger também os inter-relacionamentos entre os recursos hídricos e os aspectos geoambientais e socioculturais, visando garantir a qualidade de vida da sociedade, o desenvolvimento socioeconômico e a conservação de suas reservas ecológicas.

Ainda no que tange a influência da variação climática em regiões semiáridas (aquelas mais susceptíveis a essas alterações), estudos realizados por Araújo (2012), Cirilo (2008), Marengo (2008), Montenegro e Montenegro (2012) apontam para um aquecimento das regiões semiáridas. Essas modificações no clima podem provocar ou acentuar eventos extremos, tanto de escassez quanto do aumento de chuvas em algumas porções do semiárido brasileiro. Nesse sentido, faz-se necessário cada vez mais a realização de estudos de previsão e tendências de chuva, aliados a políticas públicas de planejamento para enfrentar os problemas advindos de eventos climáticos extremos (ALMEIDA et al., 2014; BACK, 2001; GALVÍNCIO et al., 2006; GUIMARÃES et al., 2005).

De acordo com Mata et al. (2001), o século XXI pode apresentar uma maior frequência de eventos extremos de precipitação, secas e enchentes, ocasionando um aumento no risco de deslizamentos de terra, erosão, redução do potencial agrícola e da disponibilidade hídrica. No Brasil, estão previstos aumentos de temperatura entre 1° e 6° C, dependendo do cenário de emissão de gases de efeito estufa, que causarão aumento da evaporação, provocando alterações no balanço hídrico (NOBRE, 2001).

Os impactos futuros das alterações climáticas para as regiões semiáridas podem causar a intensificação e o prolongamento de secas, além de gerar sérios problemas, como por exemplo, a escassez hídrica e o colapso no abastecimento de água. As secas também podem gerar impactos socioambientais de várias magnitudes, como desertificação, redução do potencial agrícola, êxodo rural para os aglomerados urbanos, por isso, se faz necessário pesquisar as tendências de variações climáticas, bem como a sensibilidade da bacia hidrográfica às mudanças sociais e ambientais, buscando uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos disponíveis.

1.1. Hipótese

Diante do que foi exposto até o momento, esta pesquisa busca entender, sob um olhar geográfico, como e quanto a variabilidade climática, social e ambiental afeta a disponibilidade hídrica do reservatório Epitácio Pessoa, pautando-se na hipótese de que esta disponibilidade não atenderá a demanda da população de Campina Grande e demais cidades abastecidas pelo reservatório, mesmo com a chegada das águas da transposição do rio São Francisco.

Esta pesquisa apoia-se ainda no fato de que a chegada das águas do rio São Francisco e a “estabilização” do volume armazenado no reservatório Eptácio Pessoa trouxeram novamente a abundância e o conforto hídrico, ou de acordo com Brito (2008; 2013), o “afogamento” do problema de escassez nos períodos de estiagem. Porém, até quando esse fato continuará sendo uma realidade? Sendo assim, a escolha desta temática e da área de estudo deveu-se ao fato da importância deste reservatório na manutenção e desenvolvimento da cidade de Campina Grande e demais cidades abastecidas por esse reservatório.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar os impactos futuros no volume do reservatório Eptácio Pessoa com base na variabilidade da precipitação, no crescimento populacional e nas mudanças no uso e ocupação do solo.

2.2. Objetivos específicos

- Projetar o crescimento populacional e a demanda hídrica entre 2020 e 2030 para os municípios atendidos pelo reservatório Eptácio Pessoa;
- Simular a precipitação e o uso e ocupação do solo para o período de 2020 a 2030 no reservatório Eptácio Pessoa;
- Analisar as tendências de séries temporais de chuva e vazão de 1963 a 1991 para a bacia hidrográfica do reservatório Eptácio Pessoa;
- Realizar modelagem de chuva-vazão de 1963 a 1991 para a bacia hidrográfica do reservatório Eptácio Pessoa;
- Simular o comportamento do volume do reservatório Eptácio Pessoa para o período de 2020 a 2030.

3. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA

Para o desenvolvimento da pesquisa tomou-se como objeto de estudo o volume de água no reservatório Epitácio Pessoa, popularmente conhecido como reservatório de Boqueirão. Para permitir um estudo envolvendo as características físicas da área de interesse foi obtido o limite físico, delimitado pela topografia da bacia hidrográfica que contribui com os volumes que escoam para o reservatório Epitácio Pessoa, assim, definiu-se por chamar de bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa.

A bacia do reservatório Epitácio Pessoa está localizada na Mesorregião da Borborema, entre as coordenadas 36°00' e 37°30' de longitude oeste e 06°30' e 08°30' de latitude sul (Figura 1). Essa bacia possui uma área total de aproximadamente 12.351,58 km², compreendendo 41 municípios, com uma população total em torno de 725.747 habitantes (IBGE, 2016).

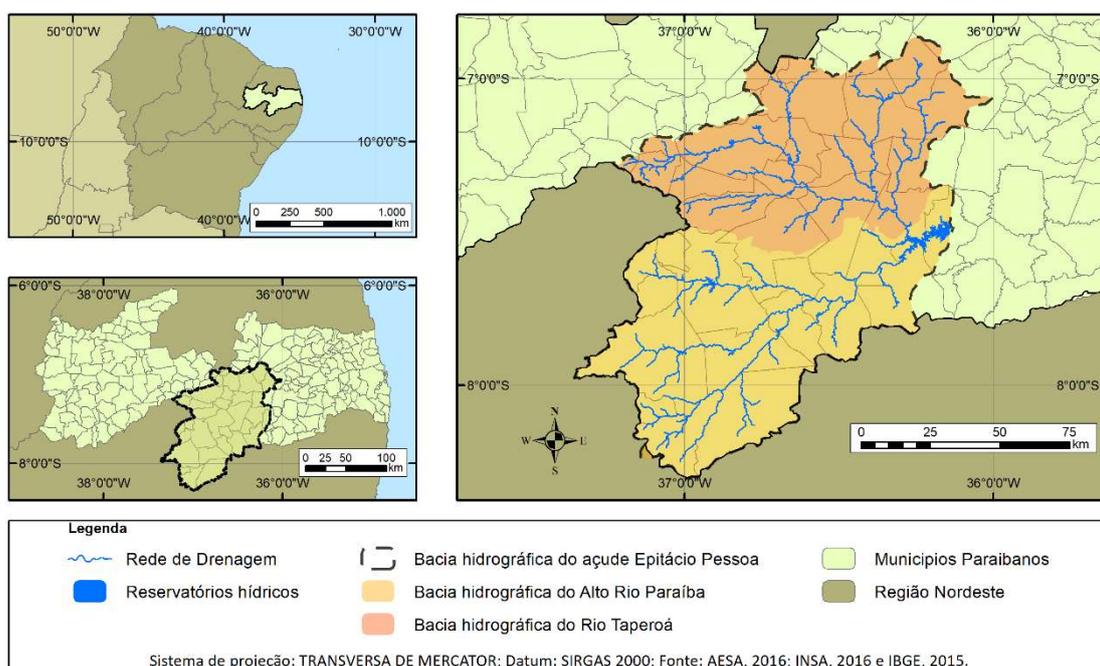


Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa.

A bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa se encontra geograficamente localizada no centro de uma região cercada por uma cordilheira fragmentada. A contribuição do fluxo para o reservatório Epitácio Pessoa vem principalmente das sub-bacias do Alto Paraíba e do Taperoá. Os cursos de águas naturais que cortam a região de estudo e que

beneficiam de alguma forma o solo e a produção agropecuária da região são os seguintes: (a) rio Paraíba, (b) riacho do Marinho Velho, (c) riacho da Perna, (d) riacho dos Canudos, (e) riacho da Ramada, (f) riacho da Relva, e (g) riacho do Feijão.

A área de estudo possui temperaturas médias anuais em torno de 26°C e classificação climática de Köppen do tipo Bsh, caracterizada por chuvas escassas com médias históricas de cerca de 500 mm/ano, concentradas entre os meses de fevereiro a maio (NASCIMENTO e ALVES, 2008).

Com relação a vegetação, a área de estudo está localizada integralmente no bioma Caatinga, possuindo espécies caducifólicas e presença de plantas espinhosas e com boa adaptação às condições climáticas (BEUCHLE et al., 2015). A geologia da bacia é composta principalmente por rochas cristalinas do período pré-cambriano.

Quanto aos tipos de solos, a região da bacia em estudo é formada por solos do tipo Bruno não-Cálcico de pouca espessura que cobre todo o cristalino existente na área de abrangência, com a presença de Litólicos, Solonetz Solodizado, Regossolos e Cambissolos. Sob o ponto de vista taxonômico, a bacia apresenta uma associação de solos Litólicos, Solonetz Solodizado, Regossolos e Cambissolos e afloramentos. Os solos Litólicos predominam com relação aos outros, tornando a bacia quase que impermeável (GALVÍNCIO et al., 2006). Os solos geralmente são rasos e argilosos, pouco lixiviados e com predomínio de erosão laminar (SOUZA et al., 2009).

A hidrografia da bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa é considerada pobre em diversos aspectos, de maneira que as condições hídricas são insuficientes para suprir o escoamento dos rios nos longos períodos de ausência de precipitação. Os rios e reservatórios da região são irregulares, com características intermitentes, onde a água superficial desaparece durante o período de estiagem. Com períodos de seca estacional bem definido.

3.1. A bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba

A bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba está situada na parte sudoeste do Planalto da Borborema, localizando-se entre as latitudes 7,34° e 8,30° sul e entre as longitudes 36,12° e 37, 35° oeste. Esta bacia limita-se ao sul e ao oeste com o estado de Pernambuco, e ao norte com a bacia do rio Taperoá (AESA, 2018).

Na bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba estão inseridos, total ou parcialmente, os municípios de Amparo, Barra de São Miguel, Boqueirão, Cabaceiras, Camalaú, Caraúbas, Congo, Coxixola, Monteiro, Ouro Velho, Prata, São Domingos do Cariri, São João do Cariri, São João do Tigre, São Sebastião do Umbuzeiro, Serra Branca, Sumé e Zabelê (MEDEIROS, 2003). Essa bacia drena uma área de aproximadamente 6.717,39 km², possuindo como principais contribuintes, o rio Monteiro, o rio Umbuzeiro e o rio Paraíba.

3.2. A bacia hidrográfica do Rio Taperoá

A bacia hidrográfica do Rio Taperoá está situada na porção central do estado da Paraíba, entre as latitudes 6°86' e 7°57' sul e entre as longitudes 36°16' e 37°02' oeste. Limita-se com as sub-bacias do rio Espinharas e do rio Seridó a oeste, com a região do Alto Paraíba ao sul, com as bacias do Jacu e Curimataú ao norte e com a região do Médio Paraíba a leste (AESAS, 2018).

No interior da sub-bacia, distribuem-se inteiramente ou parcialmente os seguintes municípios: Assunção, Barra de Santa Rosa, Boa Vista, Cabaceiras, Cacimbas, Desterro, Gurjão, Juazeirinho, Junco do Seridó, Livramento, Olivedos, Parari, Pocinhos, Salgadinho, Santo André, Serra Branca, São João do Cariri, São José dos Cordeiros, Seridó, Soledade, Taperoá, Teixeira e Tenório.

O principal rio dessa bacia é o Taperoá, com regime intermitente, nasce na serra do Teixeira e desemboca no rio Paraíba, no reservatório Eptácio Pessoa. Essa bacia drena uma área de cerca de 5.668,25 km² e recebe contribuições de cursos d'água como os rios São José dos Cordeiros, Floriano, Soledade e Boa Vista além dos riachos Carneiro, Mucum e da Serra (GALVÍNCIO et al., 2006).

4. O RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA

O reservatório Eptácio Pessoa, conhecido popularmente como reservatório Boqueirão, recebe água das bacias hidrográficas do Alto Rio Paraíba e do Taperoá. Esse reservatório 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 maior da Paraíba em capacidade de acumulação, sendo o maior da bacia do rio Paraíba.

O reservatório foi construído com o objetivo inicial de gerar energia elétrica e fornecer água para a irrigação agrícola. Logo após sua inauguração, mais um uso foi integrado ao reservatório, o abastecimento da cidade de Campina Grande, com a construção de uma adutora para atender o abastecimento urbano. Outros usos como a perenização ou regularização do rio Paraíba, atividades pesqueiras, dessedentação de animais, práticas esportivas e de lazer foram incorporados ao longo do tempo (BRITO, 2008).

No ano de sua inauguração, o reservatório Epitácio Pessoa contava com um volume de armazenamento de 535.680.000 m³, entretanto dados da última batimetria realizada em 2004 pela SEMARH (2004) revelaram uma capacidade de 411.686.287 m³, ou seja, 23,15% a menos que a sua capacidade inicial.

De acordo com Rêgo et al. (2015), 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 espalhados pelas microrregiões de Campina Grande, Cariri Ocidental e Cariri Oriental. 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 reservatório Epitácio Pessoa para o Estado paraibano.

Por localizar-se numa região de clima quente e seco, com o menor total pluviométrico do país, o reservatório Epitácio Pessoa 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., 2011).

Atualmente, o reservatório passa pela maior crise hídrica ao longo de sua existência, pois no início de 2017, atingiu o seu menor volume armazenado (3,6% do seu volume total), segundo dados de AESA (2017).

5. ESTRUTURA DA TESE

O desenvolvimento desta pesquisa é aqui apresentado em cinco capítulos para melhor estruturação dos temas e resultados. Nesse sentido, o texto se inicia no Capítulo I

com as Considerações Iniciais sobre a temática estudada, a hipótese desta tese, bem como os objetivos geral e específicos e uma breve descrição da área de estudo e do reservatório Epitácio Pessoa. O Capítulo II apresentará a fundamentação teórica abordando a categoria de análise geográfica utilizada, o semiárido brasileiro, a disponibilidade hídrica, um histórico do abastecimento de água em Campina Grande, o projeto de integração do rio São Francisco, e os fundamentos das projeções populacionais.

O Capítulo III abordará os procedimentos metodológicos necessários para realizar a projeção da população, a simulação de cenários de uso do solo, a aquisição, tratamento e análise de dados de precipitação, a variabilidade climática e a análise estatística da precipitação. Ainda no Capítulo III serão abordados os procedimentos para a modelagem hidrológica.

O Capítulo IV apresentará os resultados obtidos na pesquisa. As considerações finais e conclusões deste trabalho serão demonstradas no Capítulo V, onde serão apontadas possíveis estratégias para gerenciar os “possíveis problemas” levantados na pesquisa, buscando a minimização dos seus impactos. A Figura 2 apresenta um resumo ilustrativo da pesquisa.

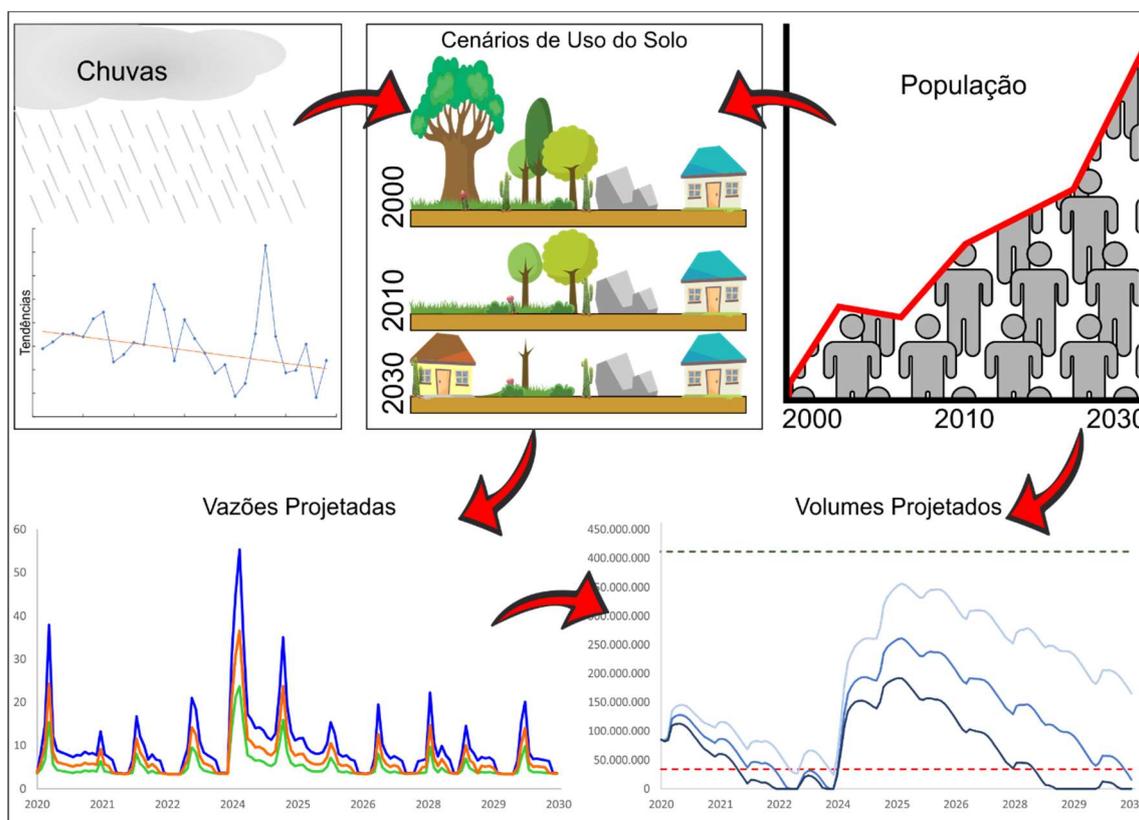


Figura 2 - Resumo ilustrativo da pesquisa.

CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. A PAISAGEM COMO CATEGORIA DE ANÁLISE

O ponto inicial da pesquisa são as análises de séries temporais de precipitação e sua espacialização. Nesse sentido, este estudo utilizará como categoria geográfica a Paisagem.

O termo paisagem já existia antes mesmo da elaboração do conceito, expressões de paisagem podem ser encontradas nas artes e nas ciências de diversas culturas, retratando elementos particulares como animais selvagens, conjuntos de montanhas ou rios, passando pela influência da filosofia, estética, política e religião dentre outros aspectos.

O conceito foi sendo moldado a partir de fundamentos distintos, criando variações conforme a origem da sua elaboração, porém, parâmetros mais ou menos comuns são mantidos nas definições (MAXIMIANO, 2004).

Para Bertrand (2004), o conceito de paisagem é o resultado de uma combinação dinâmica e instável, que é composta de elementos físicos, biológicos e antrópicos, reagindo dialeticamente uns com os outros, de forma indissociável e em constante evolução. Esse autor frisa ainda que não se trata apenas da paisagem “natural”, mas da paisagem total, integrando todas as implicações das ações antrópicas e ambientais.

Corroborando com essa definição Maximiano (2004) diz que o conceito de paisagem é entendido como um produto visual de interações entre elementos naturais e sociais que, por ocupar um espaço, pode ser cartografado em escala macro ou de detalhe, e classificado de acordo com um método ou elemento que o compõe. Para ele, paisagem não é o mesmo que espaço, mas parte dele, algo como um parâmetro ou medida multidimensional de análise espacial.

Bigotto et al. (2006) destacam que a paisagem é para a Geografia uma categoria que possibilita uma primeira análise do espaço geográfico, e que esses espaços se transformam constantemente, uns mais rápidos que outros, e sempre que ocorrem essas transformações as paisagens que os representam também mudam. Por isso, eles afirmam que a paisagem representa um espaço dinâmico.

Moraes (1988) relata o surgimento de uma nova corrente geográfica denominada de Teorética-Quantitativa, que absorvia os conhecimentos da Estatística e da Matemática,

adotando uma visão epistemológica baseada nas ciências da natureza e no raciocínio do método hipotético-dedutivo, onde, de acordo com o autor, “troca-se o empirismo da observação direta (do “ater-se aos fatos” ou dos “levantamentos dos aspectos visíveis”) por um empirismo mais abstrato, dos dados filtrados pela estatística (das “médias, variâncias e tendências”).

O conceito de paisagem é ampliado de acordo com Souza (2017), após a Segunda Guerra Mundial, com a utilização imagens e fotos geradas por aeronaves e satélites, passando a ser compreendido como um sistema de elementos naturais e sociais interdependentes.

Ferreira (2007) identificou os pontos de maior ou menor restrição hídrica, limites de possível irreversibilidade e a indicação de alternativas de manejo para a bacia do rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. O autor aplicou o conceito de paisagem, considerado útil aos estudos integrados dos elementos territoriais naturais e socioculturais, e afirma que a adoção das perspectivas da paisagem apresenta uma série de vantagens, permitindo a análise integrada de características naturais, socioculturais e de atividades antrópicas para os setores internos da bacia, o que possibilitou a indicação de alternativas específicas de manejo sustentável.

Maciel e Lima (2011) realizaram um resgate da construção do conceito de paisagem, enquanto categoria de análise geográfica, e apontam que essa categoria é a mais indicada para se realizar uma melhor análise do espaço geográfico.

Partindo dos conceitos apresentados, serão analisados os impactos hidrológicos e socioambientais causados pela variabilidade climática e gestão ineficaz dos recursos naturais e suas consequências na disponibilidade hídrica do reservatório Epitácio Pessoa.

Diante do contexto apresentado, esta pesquisa adota a paisagem como categoria geográfica de análise, tendo em vista que serão abordadas características naturais e antrópicas na área de estudo, vindo ao encontro do que foi exposto.

2. O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

A região Semiárida do Brasil abrange nove estados da região Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe) e o norte do estado de Minas Gerais (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Possui uma extensão territorial de 980.133,079 km², incluindo-se nessa região as localidades que atendem a pelo menos um destes critérios: a) precipitação média anual inferior a 800 milímetros; b) índice de aridez de até 0,5 e; c) risco de seca maior que 60% (SUDENE, 2017).

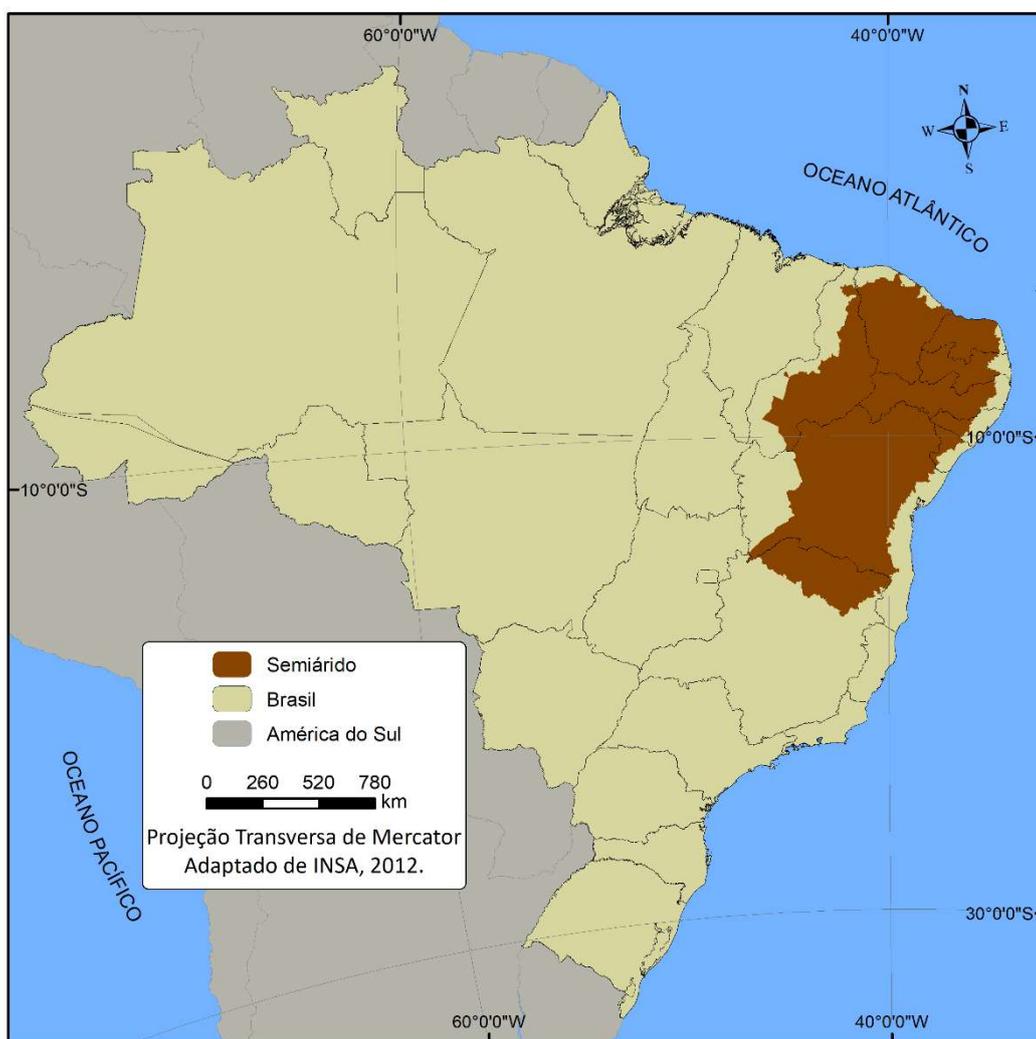


Figura 3 – Distribuição do Semiárido no território brasileiro.

Dessa forma, estão inseridos no semiárido brasileiro 1.262 municípios, com uma população de aproximadamente 27 milhões de. O estado da Paraíba, onde se localiza o

reservatório Epitácio Pessoa, tem um território total de 56.469,466 km², com uma população total de 3.766.528 habitantes, sendo que 86,2% desse território estão inseridos na região semiárida, com uma população de 2.092.400 habitantes e uma densidade demográfica de 42,99 habitantes/km² (MEDEIROS et al., 2012).

O balanço hídrico no semiárido brasileiro é similar ao observado em outras regiões isoclimáticas do planeta, como Israel, por exemplo, que tem uma pluviometria média variando entre 800 mm/ano no Norte e 30 mm/ano no Sul (REBOUÇAS, 1997). Entretanto, o semiárido brasileiro difere-se dos demais por possuir uma concentração populacional maior do que outras regiões similares.

O semiárido brasileiro possui uma precipitação média anual que varia entre 500 e 850 mm, com 70% das chuvas concentradas entre os meses de janeiro e maio, evaporação potencial anual média variando entre 2.100 e 2.600 mm, evaporação real média variando entre 450 e 700mm ao ano e os solos são geralmente rasos, estando sobre o embasamento cristalino, e os cursos d'água são intermitentes (FRISCHKORN et al., 2003; GÜNTNER e BRONSTERT, 2004).

As questões associadas à vida em regiões semiáridas não podem ser expressas apenas por essas definições. Hidrologicamente, o aspecto mais proeminente é a contínua interrupção na disponibilidade natural de água. No semiárido são extremamente necessárias as intervenções humanas para que a vida social se viabilize (ARAÚJO, 1990). Reflexo disso são as baixas taxas de densidade encontradas nessas regiões pelo mundo, entretanto, o semiárido brasileiro é possivelmente o mais habitado.

Dessa forma, a necessidade de uma gestão hídrica mais eficiente é ainda mais relevante, já que o mau uso dos recursos hídricos existentes aliado às baixas precipitações e secas periódicas, afeta social e economicamente a população. Os reservatórios hídricos são submetidos aos impactos das atividades em suas margens e também no corpo d'água, juntamente com as variações climáticas torna-os bastante vulneráveis.

Aliado a esses problemas, a evaporação extremamente alta na região semiárida (média de 2.000 mm/ano) concentra nutrientes e sais que se expressam na alta salinidade e na rápida eutrofização que caracterizam a maioria dos Corpos hídricos da região (GUIMARÃES et al., 2005).

De acordo com Cirilo (2008), os reservatórios hídricos do nordeste foram construídos de duas formas, sendo a primeira a dos grandes reservatórios, com número

reduzido mas distribuídos por toda região e com capacidade de armazenamento de bilhões de metros cúbicos, e os de pequeno porte, chegando a armazenar milhares de metros cúbicos.

A disseminação da política da açudagem no semiárido brasileiro teve início no final do século XIX com a criação da Comissão da Seca, criada por D. Pedro II, que começou com a construção do reservatório de Quixadá entre 1888 e 1906. Em 1909 é criado o Instituto de Obras Contra as Secas (IOCS), posteriormente renomeado para Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS), assumindo sua denominação atual de Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) em 1954 (GUERRA, 1981).

Um fator limitante ao emprego da política de açudagem é a elevada evapotranspiração de referência do semiárido brasileiro. De acordo com Vieira (2003), os pequenos reservatórios do semiárido tem um baixo rendimento, com perdas na ordem de 25%, sendo esse valor a razão entre o volume regularizado anual e a capacidade do reservatório.

Com a disseminação indiscriminada dos pequenos reservatórios, surgem ainda outros problemas, que são os impactos das suas instalações nas bacias hidrográficas circunscritas, capazes de promover efeitos negativos para outros usuários, principalmente nos de jusante, isso porque esses barramentos podem interferir na gestão da água na bacia, bem como na degradação da qualidade das águas como apontam Suassuna e Audry (1995). Esses autores realizaram um estudo de caracterização da qualidade da água nos pequenos reservatórios do Nordeste e detectaram riscos de degradação, caso não ocorram uma circulação hídrica devida e a renovação de suas águas.

Dessa forma, um fator importante a ser considerado para a convivência com o semiárido é a disponibilidade hídrica. E esse fator deve ser visto como uma questão de fluxo de água e não de volume. Não se deve falar em disponibilidade hídrica em termos volumétricos, mas em termos de vazão, pois se trata de um ciclo com a água em movimento constante de um estado físico para outro (CHAPRA, 1997).

3. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A disponibilidade hídrica é a vazão que pode ser utilizada nas diversas atividades de consumo e desenvolvimento da sociedade, sem que para isso ocorra o comprometimento da vazão ecológica que é a quantidade mínima de água para a manutenção dos ecossistemas fluviais. Ela pode ser representada em uma bacia hidrográfica a partir das vazões médias e mínimas, sendo o conhecimento dessas de grande importância para um adequado planejamento do uso e da gestão compartilhada dos recursos hídricos, minimizando assim os conflitos entre os diversos usuários (CRUZ e SILVEIRA, 2007; CRUZ e TUCCI, 2008; MILHOUS, 1998; NOVAES, 2005).

A avaliação da disponibilidade hídrica de uma bacia deve ser iniciada a partir da identificação dos seus principais reservatórios e, através do balanço hídrico multianual, avaliar sua capacidade de suporte, que é o potencial de água que se pode explorar de um reservatório sem que o mesmo se degrade com o tempo, quantitativa e qualitativamente. Dessa forma, deve-se buscar a sustentabilidade da disponibilidade hídrica, adequando-a a capacidade de suporte da bacia.

Outro fator importante para um adequado gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica é o conhecimento das demandas hídricas, que podem ser estimadas a partir do cadastramento de usuários, que deve ser dinâmico e contínuo no tempo.

O estudo da disponibilidade hídrica confrontado com a demanda hídrica é uma informação básica de apoio à decisão e possui diversas interpretações, função de particularidades jurídicas, sociais, ambientais e econômicas de cada região (CRUZ, 2001).

Identificar a disponibilidade e a demanda hídrica é de suma importância para gerenciar os processos de outorga de água. Apesar de serem bastante eficazes, esses estudos avaliam apenas as situações de curto prazo. Sendo assim, para uma melhor gestão dos recursos hídricos de uma bacia, se faz necessário adicionar outros componentes, como as tendências de precipitação, a variabilidade climática e a modelagem hidrológica.

4. HISTÓRICO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CAMPINA GRANDE

O município de Campina Grande está localizado no Agreste da Borborema, ocupando uma posição privilegiada, servindo de ponto de ligação entre o litoral e o sertão. O seu surgimento se deu a partir do final do século XVII, quando de acordo com Câmara (1999), o capitão-mor Teodósio de Oliveira Ledo voltava de uma viagem trazendo índios Ariús escravizados e avistou uma planície entre as serras de Bodopitá e dos Brejos, onde escolheu a margem de um riacho (Piabas) para deixar os índios, fundando assim a aldeia da Campina Grande, que recebeu esse nome devido a circunstância geográfica de sua localização.

No ano de 1698 chega à aldeia um frade do convento de Santo Antônio para catequizar os índios que habitavam a vila. Por volta do ano de 1701 iniciou-se a construção de uma capela, sendo o local escolhido para a sua construção o mesmo onde hoje está edificada a igreja Matriz de Campina Grande (CÂMARA, 1999).

Após a construção da capela, apareceram colonos e parentes do capitão-mor Oliveira Ledo, requerendo áreas de sesmaria para instalar currais e cultivar a agricultura. As áreas da campina foram então ocupadas de acordo com as características geográficas e de adaptabilidade à pecuária ou agricultura. A cultura da mandioca, porém, foi a que predominou e deu início às primeiras indústrias campinenses, as casas de farinha. Esses empreendimentos levaram os lavradores a povoar a campina, transformando-a em um ponto de convergência de tropeiros e boiadeiros dos sertões, passando a ser um dos principais interpostos do comércio de farinha e gado entre o litoral e os sertões (CÂMARA, 1999). De acordo com o autor, no ano de 1788 a aldeia ou povoado da Campina Grande passa a situação de vila, sendo chamada de Vila Nova da Rainha, sendo oficializada a sua transformação em vila no dia 20 de abril de 1790.

Ainda no ano de 1790, Câmara (1999) aponta que a população da vila, incluindo as povoações e fazendas da jurisdição, poderia atingir oito mil pessoas, incluindo os escravos, e que na vila contavam-se no máximo cem casas, espalhadas em três ruas. O abastecimento de água provinha dos mananciais da Lagoa Seca, a uma distância de mais de uma légua, e de poços de água salobra nos seus arredores.

Com o desenvolvimento da vila e conseqüentemente o crescimento da população, foi inaugurado no ano de 1830 o açude Velho, primeiro reservatório criado para atender o abastecimento de água de Campina Grande. Suas obras foram iniciadas no ano de 1828,

vindo a ser concluído em 1844, após passar por uma ampliação (BRITO, 2008). O autor destaca ainda que a construção do açude Velho se deu para combater os efeitos provocados pelas secas e pelo aumento da demanda por água, tendo em vista o crescimento demográfico da vila.

Pouco tempo após o início da construção do açude Velho, deu-se início às obras de construção de um outro reservatório em Campina Grande, o qual foi inaugurado no ano de 1831, sendo chamado de açude Novo. A construção desse reservatório veio como uma medida auxiliar de abastecimento para a vila (CAMPINA GRANDE, 1984).

No ano de 1851, Silva Filho (2005) aponta que a população livre e escrava na vila eram de 17.895 pessoas. Essa informação mostra o crescimento populacional da vila. Comparando com o ano de 1790 há um incremento de 123,7% em um período de 61 anos. Ainda segundo o autor, no ano de 1864 a vila é elevada à categoria de cidade pela Lei nº 127.

De acordo com Brasil (2004), no ano de 1859 o Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro – IHBG elaborou o primeiro trabalho de reconhecimento da porção norte do Nordeste. Os resultados enfatizaram a necessidade de melhoramento das estruturas de transporte e armazenamento de água na região. Entre as propostas apresentadas estava a de um sistema que levaria águas do rio São Francisco para o rio Jaguaribe no interior do Ceará. Esse foi o embrião do atual projeto de integração do rio São Francisco.

O projeto de integração do rio São Francisco foi inviabilizado por várias vezes e por diversos motivos, passou ainda por modificações e acabou sendo dividido em dois eixos, o Norte e o Leste, beneficiando vários municípios do semiárido brasileiro (BRASIL, 2004).

Em 1866 foi enviado ao chefe do poder executivo da província uma síntese dos estudos e observações feitas no alto sertão do estado, onde foi apontada a necessidade de construção de mais um reservatório na região de Campina Grande, buscando-se amenizar os problemas gerados pelas secas, sendo o pontapé inicial para a construção do reservatório de Bodocongó (SILVA FILHO, 2005), porém o início efetivo das obras só se deu no ano de 1915, sendo concluído e inaugurado em 1917.

Devido ao alto teor de sais nas suas águas, o reservatório de Bodocongó não teve importância no processo de abastecimento da cidade, mas contribuiu para atrair indústrias para o seu entorno que utilizavam suas águas, expandindo a área urbana da cidade com o surgimento de um bairro com o mesmo nome do reservatório (BRITO, 2008).

Atualmente, o açude Velho não é mais utilizado para abastecimento, sendo nele despejado parte do esgoto da cidade. O açude Novo foi soterrado, dando lugar a uma praça com o mesmo nome do reservatório. O reservatório de Bodocongó, pela qualidade das suas águas, nunca foi efetivamente utilizado para o abastecimento da cidade.

Inicia-se em dezembro de 1925 os estudos para a primeira transposição de águas para Campina Grande, que seria realizada aproveitando os reservatórios de Puxinanã e Grota Funda. Em pouco menos de dois meses já é assentado em Campina Grande o primeiro tubo de abastecimento proveniente dessa transposição, sendo do ano de 1927 o registro da chegada de águas na cidade. Em 20 de outubro de 1928 surge o decreto estadual nº 1.542 que regulamentava o “Serviço de Abastecimento de Água de Campina Grande” (SILVA FILHO, 2005). Essas iniciativas sanaram de forma emergencial os problemas de abastecimento de água da cidade, pois as autoridades já sabiam que a vazão proveniente desse sistema só atenderia uma demanda específica de consumo durante um curto período de tempo (SOUZA, 2013).

De acordo com Campina Grande (1984), no ano de 1936 a cidade já era a principal cidade do interior do Nordeste, destacando-se pelo comércio de algodão na condição de terceira praça algodoeira no mercado mundial. A cidade contava com uma população de cerca de 100.000 habitantes, aproximadamente 15 indústrias, 5 estabelecimentos bancários, além de colégios, cinemas, clubes, etc. Um grande incentivo para impulsionar o progresso da cidade foi o início do abastecimento de águas no ano de 1937.

A cidade continua a crescer e demandar ainda mais água, fazendo com que no ano de 1939 fosse construído um novo reservatório para atender ao abastecimento de Campina Grande, chamado de reservatório Vaca Brava, localizado na região do Agreste/Brejo, a cerca de 40 km da cidade, sendo essa a segunda transposição de águas para Campina Grande (BRITO, 2008).

Com o passar do tempo Campina Grande recebe mais uma obra para incrementar a disponibilidade de água, o reservatório de Boqueirão de Cabaceiras, posteriormente nomeado reservatório Epitácio Pessoa. Localizado na cidade de Boqueirão, o reservatório é fruto de uma política desenvolvimentista promovida no plano nacional pelo presidente Juscelino Kubitschek, que visava, no caso campinense, assegurar a ampliação do sistema de abastecimento de água para a cidade (SOUZA, 2013).

O reservatório teve suas obras iniciadas no ano de 1951 e foi inaugurado em janeiro de 1957. Tinha como objetivo atender usos múltiplos, como agricultura e geração de energia (BRITO e VIANNA, 2008).

O sistema de captação e distribuição das águas do reservatório era composto inicialmente por uma tubulação e uma estação elevatória, subdividida em duas tubulações que levam as águas do reservatório até a Estação de Tratamento de Água (ETA-Gravatá) no município de Queimadas, distante 22 km do reservatório. Nessa estação a água é tratada e posteriormente distribuída através de outras duas elevatórias, uma com duas adutoras, sendo a mais antiga do ano de 1957 e outra construída no ano de 1972, e a segunda elevatória é composta de uma adutora, construída no ano de 1994. A partir delas a água é distribuída para Campina Grande e outras localidades, conforme pode ser observado na Tabela 1 (MENESES, 2011).

Tabela 1 - Localidades atendidas pelo sistema de abastecimento de Campina Grande.

Localidade	População		Número de ligações de água (novembro/2010)	Percentual de micromedição
	Urbana	Rural		
Alagoa Nova	9.922	9.797	2.781	51,74
Barra de Santana	4.059	731	313	70
Campina Grande	367.278	17.998	116.835	88,8
Caturité	1.025	3.521	655	80,09
Galante	Incluído em Campina Grande		2.338	64,76
Lagoa Seca	10.585	15.326	3.330	60,45
Matinhas	682	3.634	226	95,58
Pocinhos	9.615	7.404	3.348	82,14
Queimadas	22.249	18.805	8.595	71,13
São Seb. de Lagoa de Roça	4.659	6.382	1.519	51,88
Total	430.074	83.598	139.940	

Fonte: Meneses (2011).

A construção do reservatório Eptácio Pessoa foi de grande importância para Campina Grande e região, trazendo um “conforto hídrico”, ou seja, uma disponibilidade acima da necessidade, como pode ser observado na obra Campina Grande: Missão cumprida (IMPrensa Nacional, 1958), onde destaca-se o seguinte trecho:

“O serviço foi inaugurado pelo presidente Juscelino Kubitschek em 7 de novembro de 1958. Já agora os 110.000 habitantes da cidade

dispõem de um abastecimento de 25 milhões de litros de água, o que dá 227 litros diários “*per capita*”, ou seja, um total sete vezes maior do que o de que dispunham anteriormente. O volume poderá atender ao dobro da população atual” (IMPrensa NACIONAL, 1958, p. 8).

Porém, essa disponibilidade excedente se reflete no mau uso, devido provavelmente a uma má gestão dos recursos hídricos do reservatório, como aponta a obra intitulada “O conflito pelo uso da água do reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão) – PB” (BRITO, 2008). O autor destaca os problemas relativos às demandas de água que geraram conflitos em face da necessidade de diferentes atores que utilizam as águas do reservatório, e aponta ainda a “falta de qualquer sistema de gestão” como sendo o maior problema encontrado no reservatório.

Brito (2008) afirma ainda que nos períodos em que o reservatório apresenta um nível de armazenamento confortável, os atores políticos envolvidos na sua gestão, “em vez de aproveitar o momento para montar uma política de governança da água fora da crise”, aumentam o uso das águas do reservatório transferindo-as para regiões que encontram-se momentaneamente em crise. Como destaca o autor, “um contrassenso e uma demonstração de total desconhecimento dos aspectos físicos e da disponibilidade de recursos hídricos na região”(BRITO, 2008, p. 100).

Problemas de falta de gestão também são relatados por Rêgo et al. (2015), que analisaram a influência da gestão de recursos hídricos praticada na bacia do reservatório Epitácio Pessoa, que passava pelo quarto ano seco consecutivo (2012–2015), dando início a um período de racionamento do abastecimento de 36 até 60 horas, trazendo prejuízos à economia, saúde e bem-estar da população atingida. Os autores afirmam que a crise analisada no trabalho poderia ter sido evitada e que a sua causa não está no evento hidrometeorológico, ainda que extremo, mas sim na gestão do manancial e da bacia, caracterizadas por providências negligenciadas, tardias e equivocadas.

A partir do ano de 2000, o projeto de integração do rio São Francisco começa a se tornar uma realidade, sendo um tema polêmico, gerando discussões técnicas, intelectuais, políticas, sociais e até religiosas sobre a sua viabilidade (VILLAR, 2014). O projeto teve então parte da sua proposta, ou seja, a construção do eixo Leste, concluída no ano de 2017, e no mês de abril desse mesmo ano as águas chegaram ao reservatório Epitácio Pessoa (BRASIL, 2018).

Com a recuperação do volume hídrico do reservatório, em julho de 2017 a Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba – CAGEPA foi autorizada pela Agência Nacional de Águas – ANA e pela Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba – AESA, de acordo com Resolução Conjunta ANA/AESA Nº 1292/2017, a aumentar o volume captado para o abastecimento hídrico da região de Campina Grande, finalizando o racionamento imposto desde o início da crise em 2012 (OLIVEIRA e AMBROZEVICIUS, 2017).

Daqui em diante o que pode-se esperar é que a abundância e o conforto hídrico não tragam consigo o “afogamento” do problema de escassez, e que tanto as autoridades quanto a população, e todos os outros atores envolvidos na utilização dos recursos do reservatório, realizem um gerenciamento eficiente para que a região não tenha que enfrentar os problemas da escassez ou até mesmo a falta de água (BRITO, 2008; 2013).

5. O PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO (PISF) NO EIXO LESTE

A busca para diminuir os problemas das secas no semiárido brasileiro é uma questão que vem sendo tratada há vários séculos e remonta os tempos do Brasil colonial. Os primeiros três séculos da história do Nordeste Brasileiro não possuem registros de políticas sistemáticas promovidas pelo Estado com vistas a diminuir os efeitos prejudiciais provocados pelos períodos de estiagem no semiárido. Isso porque os danos promovidos pelas secas no Nordeste só passaram a se tornar um problema nítido quando da intensificação da ocupação do Semiárido, com o aumento do contingente populacional e do estabelecimento das fazendas de gado (DANTAS, 2018).

Nesse sentido, com a grave crise hídrica ocorrida no Nordeste a partir de 2012, que intensificou o quadro de crise de abastecimento de água, principalmente em Campina Grande, resultado de uma junção de fatores capitaneado por uma das maiores secas ocorridas na região entre 2012 e 2017 (SILVA et al., 2018), gerou a necessidade de uma solução hídrica mais eficiente para a região.

Assim, o Projeto de Integração do Rio São Francisco – PISF vem para ajudar a solucionar o problema da escassez hídrica da região. Pensar em Integração era uma ideia até a década de 80 considerada inviável, pois técnicos e estudiosos relatavam que não havia energia elétrica suficiente para que as bombas transportassem água (BRASIL, 2004). Com base em estudos mais aprofundados e com as tecnologias disponíveis nas últimas duas

décadas, essas possibilidades tornaram-se concretas. Nos anos 2000, o Projeto de Integração do rio São Francisco passa a ser uma realidade bem mais presente e a ser objeto de discussões, tornando-se um tema muito polêmico, deixando técnicos, intelectuais, partidos políticos, igrejas, governos estaduais, movimentos sociais e a população de uma maneira geral com opiniões divididas (SEGUNDO NETO, 2014).

O PISF é uma grande obra de aporte hídrico, que tem por objetivo “proposto” assegurar a demanda de água para a região que mais sofre com a irregularidade das chuvas e com prolongados períodos de escassez. Essa demanda será assegurada com a oferta das águas do rio São Francisco para rios e reservatórios do Nordeste brasileiro. O principal alvo desse projeto, que é um empreendimento do Governo Federal, sob responsabilidade do Ministério da Integração Nacional, são o Agreste de Pernambuco e da Paraíba e a região metropolitana de Fortaleza, localizados no Polígono das Secas. O fornecimento dessas águas será para o consumo humano e animal, para a irrigação e para criação de peixes.

Esse projeto está dividido em dois grandes eixos: o Norte e o Leste (Figura 4), que são compostos por canais em “V”, estações de bombeamento de água, reservatórios e usinas hidrelétricas para auto suprimento. Revestidos de concreto, esses canais tem um percurso total de 720 km. Além destes canais, são necessárias casas de bomba, túneis, aquedutos e pequenos reservatórios ao longo do percurso para poder levar uma parte da água do rio São Francisco aos grandes reservatórios existentes ou às calhas de alguns rios da região para que sejam conduzidas ao seu destino final (BRASIL, 2004).

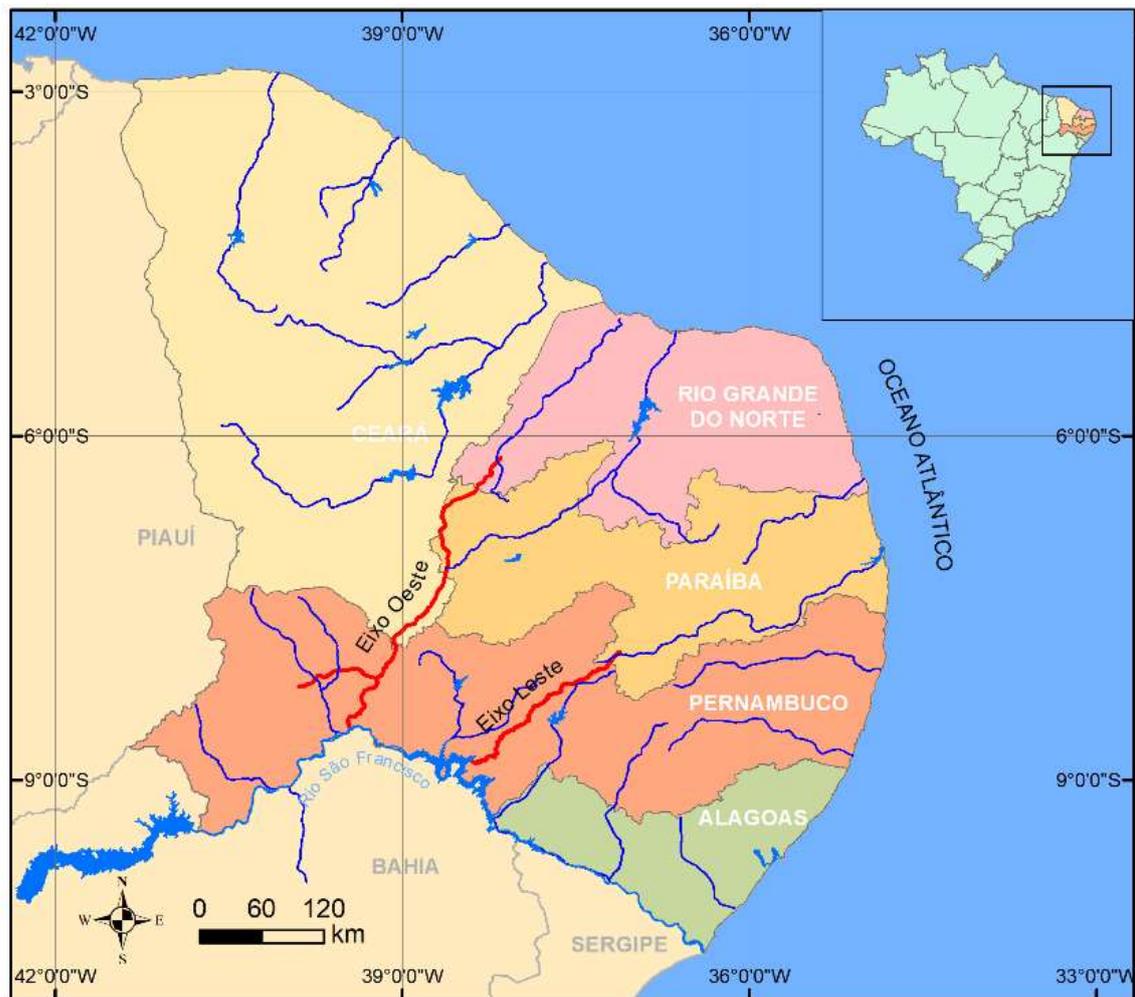


Figura 4 – Localização dos Eixos do Projeto de Integração do rio São Francisco. Adaptado de Brasil (2004).

O trecho que abastece o reservatório Epitácio Pessoa é o eixo Leste do PISF. Esse trecho se inicia no ponto de captação localizado no reservatório de Itaparica, município de Floresta, no estado de Pernambuco. Com desnível de 304 m ao longo do trecho, as águas do São Francisco irão percorrer, ao todo, 220 km até o rio Paraíba, como mostrado na Figura 5, após deixar parte da vazão para as bacias do Moxotó, Pajeú e parte do Agreste de Pernambuco. Sua vazão máxima está estimada em aproximadamente 28 m³/s, com vazão mínima contínua em torno de 10 m³/s. Os canais desse eixo medem vinte e cinco metros de largura por cinco metros de profundidade.



Figura 5 – Percurso do Eixo Leste. Adaptado de ANA (2005).

O eixo Leste levará as águas do São Francisco para o rio Paraíba, que será responsável pela manutenção dos níveis do reservatório Epitácio Pessoa e Argemiro de Figueiredo. O eixo Leste, também chamado de Trecho V, será composto por cinco estações de bombeamento, cinco aquedutos, dois túneis e nove reservatórios de pequeno porte (BRASIL, 2004).

Grandes reservatórios como Entremontes, Chapéu e Poço da Cruz, em Pernambuco, Epitácio Pessoa (Boqueirão) e Argemiro de Figueiredo (Acauã), na Paraíba são estratégicos no tocante ao recebimento dos volumes excedentes das águas transpostas em seu eixo Leste. O eixo Leste do PISF tem sua entrada, no Estado da Paraíba, a partir da bacia hidrográfica do rio Paraíba, com o objetivo de perenizar o rio Paraíba, de modo a dar segurança hídrica aos reservatórios existentes ao longo de seu curso.

Brito (2013) comenta que o eixo Leste não existia nas primeiras versões do PISF, e que apenas nos anos 2000 o Ministério da Integração Nacional – MI apresentou um primeiro projeto. Tal proposta de criação do Eixo Leste se deu após o grande colapso hídrico no tocante ao abastecimento de Campina Grande, principal cidade do interior do Nordeste e importante centro industrial, entre os anos de 1998-99.

(...) “um dos motivos que contribuíram para inserção do eixo Leste do PISF foi o risco de colapso no sistema de abastecimento de água de Campina Grande entre os anos de 1998-1999, período em que o reservatório Epitácio Pessoa enfrentou uma grande crise de aporte hídrico e pela primeira vez na história ocorreu uma ameaça eminente de abastecimento urbano de água provido pelos sistemas adutores” (BRITO, 2013 p. 234).

Durante esses anos o reservatório Boqueirão atingiu um nível crítico com apenas 14,9% de sua capacidade total (BRITO, 2013). Nesse biênio houve diversos conflitos pelo uso e acesso a água desse reservatório. Com a chegada das águas transpostas do rio São Francisco para o rio Paraíba, este deverá permanecer perenizado e os reservatórios existentes no curso do rio, deverão ter seus níveis estabilizados, podendo garantir o abastecimento dos municípios atendidos por estes reservatórios.

Os usos das águas do São Francisco serão distribuídos, segundo o MI, de acordo com a necessidade de consumo e da disponibilidade dos reservatórios por onde os canais passam, para que não ocorram enchentes e perdas de água por evaporação. É preciso ter o controle do nível dos reservatórios receptores para que seja garantida água durante prolongados períodos de seca, evitando perdas em grandes quantidades. Assim sendo, os reservatórios não precisarão ficar tão cheios para haver o suprimento de água. Contudo, essa proposta pode não atender, de fato, os anseios das populações que sofrem com a escassez.

6. PROJEÇÕES POPULACIONAIS

As projeções populacionais são cada vez mais utilizadas como subsídios para planejar o desenvolvimento econômico, social, político e ambiental em diversos países. A investigação futura do tamanho e distribuição de uma população é de relevância central para pesquisadores sobre população que estudam questões voltadas ao planejamento regional e local (BRITO et al., 2010).

A expansão urbana altera a cobertura natural das superfícies terrestres e promove a conversão de terras naturais e semi-naturais, tais como áreas florestais e terras férteis, em superfícies impermeáveis urbanas. Além disso, a expansão urbana afeta os ecossistemas, alterando os padrões de circulação biogeoquímicos (XIE et al., 2018). Estudos anteriores, em diferentes escalas em todo o mundo, mostraram que a expansão urbana geralmente

resulta em perdas simultâneas de serviços de regulação, provisionamento e suporte (BLUMSTEIN e THOMPSON, 2015; ANAYA-ROMERO et al., 2016).

Esse fenômeno é crucial para o futuro planejamento urbano porque, por um lado, a expansão urbana é caracterizada por efeitos irreversíveis e de longo prazo. Por outro lado, o crescimento da população que acompanha a expansão urbana também demanda maiores níveis de gerenciamento dos recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas, como é o caso da bacia do reservatório Epitácio Pessoa. Portanto, projetar os impactos da expansão da população futura é vital para promover o desenvolvimento regional e é de importância crucial para o planejamento futuro dos recursos hídricos.

Para suprir as carências básicas de uma população, são necessárias políticas públicas e programas sociais que, para serem implementados de maneira adequada, precisam, no mínimo, se basear em uma previsão do tamanho e da composição etária dessa população. Assim, a projeção populacional tem se tornado uma técnica demográfica cada vez mais imprescindível para planejar o desenvolvimento econômico, social, político e ambiental de uma nação (NAÇÕES UNIDAS, 1978). As projeções populacionais, para o setor público, auxiliam no conhecimento e quantificação de demandas futuras de diversas naturezas, tais como estradas, escolas, hospitais, áreas de lazer, etc., e, para o setor privado, servem para estimar o tamanho potencial de seu futuro (PRESTON et al., 2001).

Dentre alguns estudos que aplicaram métodos de estimativa populacional, pode-se destacar o de Brito et al. (2010), que avaliaram os métodos de AiBi, a relação de coortes de Duchesne e a correlação de razões, comparando os resultados desses métodos com os resultados do Censo Demográfico de 2000 e a Contagem da População de 2007. Os resultados das comparações com o Censo de 2000 indicam um nível de precisão dentro de uma margem aceitável, e erros com variação de -21,4% a 24,1%, fazendo com que as projeções tendam a ser subestimadas e ainda menos precisas quando comparadas com a Contagem de 2007.

O método AiBi baseia-se no suposto de que as populações dos municípios menores constituem uma função linear da população dos municípios maiores. Esse método tem como desvantagem a não existência de limites para as participações relativas, podendo aparecer populações negativas nas simulações. Esse método é atualmente utilizado pelo IBGE para projetar a população total dos estados e municípios brasileiros (Brito et al., 2010).

Waldvogel et al. (2003) realizaram estudo para estimar a projeção populacional para o estado de São Paulo, para auxiliar a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) na aplicação de seus serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. Esses autores utilizaram o método dos componentes demográficos, que destaca o papel da fecundidade, da mortalidade e da migração no crescimento populacional. Detectaram uma desaceleração no ritmo de crescimento e estimaram que a população do estado deverá atingir o número de 48.974.000 habitantes em 2025.

O IBGE (2004) apresentou os resultados da revisão da Projeção da população do Brasil por idade e sexo, para o período de 1980-2050. Nesse documento é apresentada a metodologia para estimar a população das unidades da federação, bem como o modelo que permite estimar a população em nível municipal.

CAPÍTULO III - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo serão abordados os procedimentos metodológicos utilizados para gerar os resultados da pesquisa, bem como a origem e tratamento dos dados utilizados. A Figura 6 apresenta um fluxograma dos procedimentos adotados neste estudo.

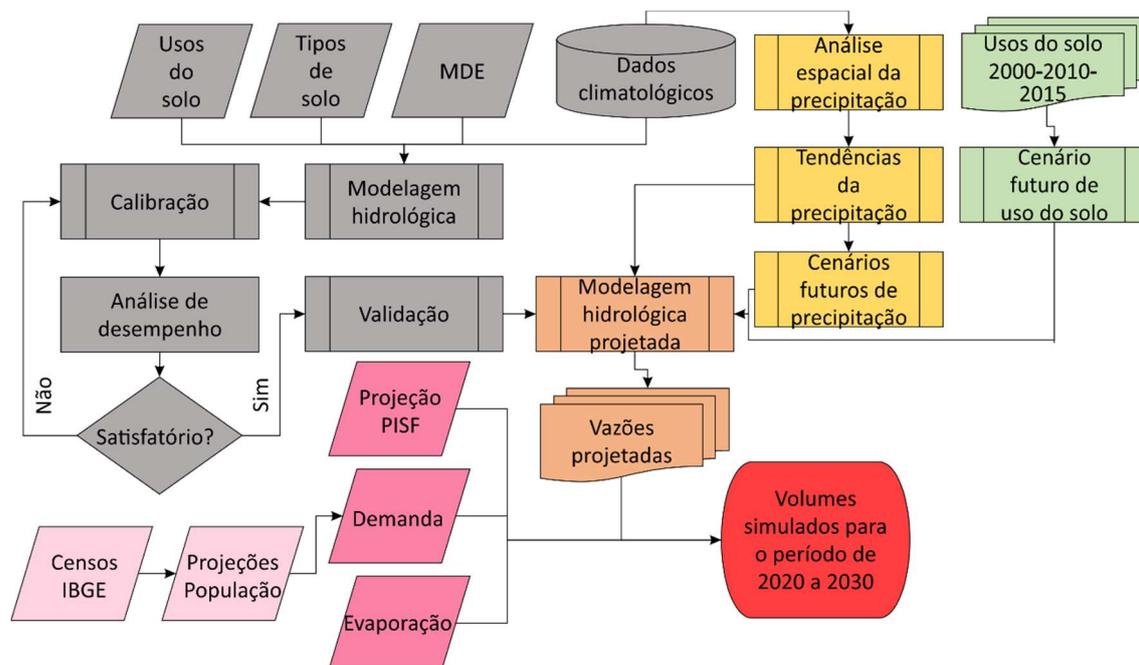


Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.

1. PROJETANDO O AUMENTO DA POPULAÇÃO ENTRE 2020 E 2030

O crescimento da população é um processo de mudança complexo que envolve diversos fatores, pois transforma áreas não-urbanas em urbanas e influência é influenciado por questões econômicas e ambientais. A estimativa populacional é vital para o conhecimento e quantificação de demandas futuras de diversas naturezas, como a demanda para o abastecimento hídrico em áreas urbanas.

Segundo López et al. (2001) e He et al. (2016), a área urbana futura pode ser prevista através de vários modelos. Neste estudo, a estimativa da população foi feita com base nos dados da população urbana de 1970, 1980, 1991, 2000, e 2010, obtidos nos censos demográficos do IBGE, e de acordo com o que propõem He et al. (2016), o tamanho da

população urbana futura pode ser obtido utilizando o método aritmético, que é dado pela Equação 1, utilizando a taxa de crescimento estimada a partir da equação 2.

$$P_t = P_2 + k_a (A_1 - A_2) \quad (1)$$

$$k_a = P_2 - P_1 / A_2 - A_1 \quad (2)$$

sendo P_t = ano de final de projeto, P_2 e P_1 = população final e inicial conhecidas, respectivamente, P_t = população de projeto, A_2 e A_1 = ano final e inicial conhecidos, respectivamente, e k_a = taxa de crescimento aritmética.

Esse método admite que a população varie linearmente com o tempo e é utilizado para períodos pequenos entre 5 e 10 anos. Assim, estimou-se a população urbana de cada um dos municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa entre 2020 e 2030.

2. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE USO DO SOLO

O acoplamento de modelos hidrológicos com os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) proporciona uma excelente ferramenta para a gestão de bacias hidrográficas. Com essa integração torna-se possível visualizar cenários do passado e do presente, além de simular impactos futuros das mudanças do uso do solo nos processos hidrológicos (SANTOS, 2015). Esse acoplamento entre SIG e modelos hidrológicos serve como um instrumento importante para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica (BLAINSKI et al., 2011; TUCCI et al., 2002; VELDKAMP et al., 2015).

Gondim et al. (2008) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação de culturas perenes na bacia do rio Jaguaribe, no estado do Ceará, utilizando um conjunto de dados climatológicos do período de 1961 a 1990, além de projeções climáticas futuras. Os autores utilizando os cenários propostos pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, projetaram para o ano de 2040 uma população global entre 8,93 e 10,71 bilhões de habitantes. Ao realizarem simulações para identificar a necessidade hídrica futura, os autores estimaram um aumento de 32,9% a 43,9% na necessidade hídrica para o ano de 2040.

Um estudo para verificar a tendência de variação da disponibilidade hídrica atual e futura foi realizado por Mello et al. (2008), que utilizaram dois cenários de mudanças climáticas propostas pelo IPCC, o cenário A2 (altas emissões de CO₂) e o B2 (baixas emissões de CO₂) para a bacia hidrográfica do rio Paracatu. Os autores realizaram o *downscaling* das precipitações mensais para os anos de 2001 a 2099 e os dados foram simulados em um modelo hidrológico que possibilitou a estimativa das vazões mínimas em 21 postos fluviométricos distribuídos na bacia. Como resultados, para o cenário A2 verificaram uma tendência de aumento na disponibilidade hídrica, variando de 31% a 131% até 2099. Já para o cenário B2, não detectaram nenhuma tendência significativa.

Moura (2007) realizou um levantamento das condições reais de oferta de água em um trecho do rio Piranhas-Açu e através da modelagem hidrológica, que incluía os principais reservatórios e o balanço hídrico dos mesmos, gerou uma série de 50 anos de dados de vazão nos reservatórios e em pontos relevantes do trecho do rio principal. Ao confrontar as vazões disponíveis com as demandas atuais e futuras de captação de água bruta no trecho, observou que as garantias de atendimento para estas demandas são elevadas.

Nesse contexto, esta pesquisa quantificou e analisou as possíveis implicações da variabilidade climática recente e futura na bacia do reservatório Epitácio Pessoa e as repercussões destas mudanças no abastecimento hídrico de Campina Grande utilizando o modelo Land Change Modeler – LCM, que permite analisar, modelar e simular as mudanças da cobertura do solo para o futuro e as consequências para a biodiversidade (EASTMAN, 2016).

O modelo LCM vem sendo utilizado em diversos estudos como o de Khawaldah (2016), que aplicou o modelo para Amman, na Jordânia obtendo, a partir da análise dos anos de 1984 e 2014, uma previsão da cobertura do solo para o ano de 2030. Os resultados desse procedimento indicaram uma expansão de 147% na área urbana entre o período de 1984 a 2014 e ainda um acréscimo de 43,9% para o ano de 2030 em relação ao de 2014. Deus (2013) utilizou o LCM na construção de cenários de uso e cobertura do solo para o planejamento ambiental na Amazônia. O autor identificou cinco áreas prioritárias com ritmo de mudanças aceleradas, como um prognóstico do desmatamento na área de estudo.

Neste estudo foi utilizado o modelo LCM para modelar um cenário futuro de mudanças de uso do solo para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa. Os procedimentos metodológicos para aplicação do modelo podem ser vistos no trabalho de Xavier (2017). A

Figura 7 mostra os procedimentos metodológicos gerais utilizados para a projeção dos cenários futuros obtidos neste estudo. Inicialmente são apresentados os materiais e métodos utilizados no mapeamento do uso e ocupação do solo para o ano de 2000 (t_1), 2010 (t_2) e 2015 (t_3). Em seguida, ainda na mesma figura são apresentados os dados utilizados para a modelagem da predição do uso e ocupação do solo na área de estudo para o ano de 2030 (t_4), com o LCM.

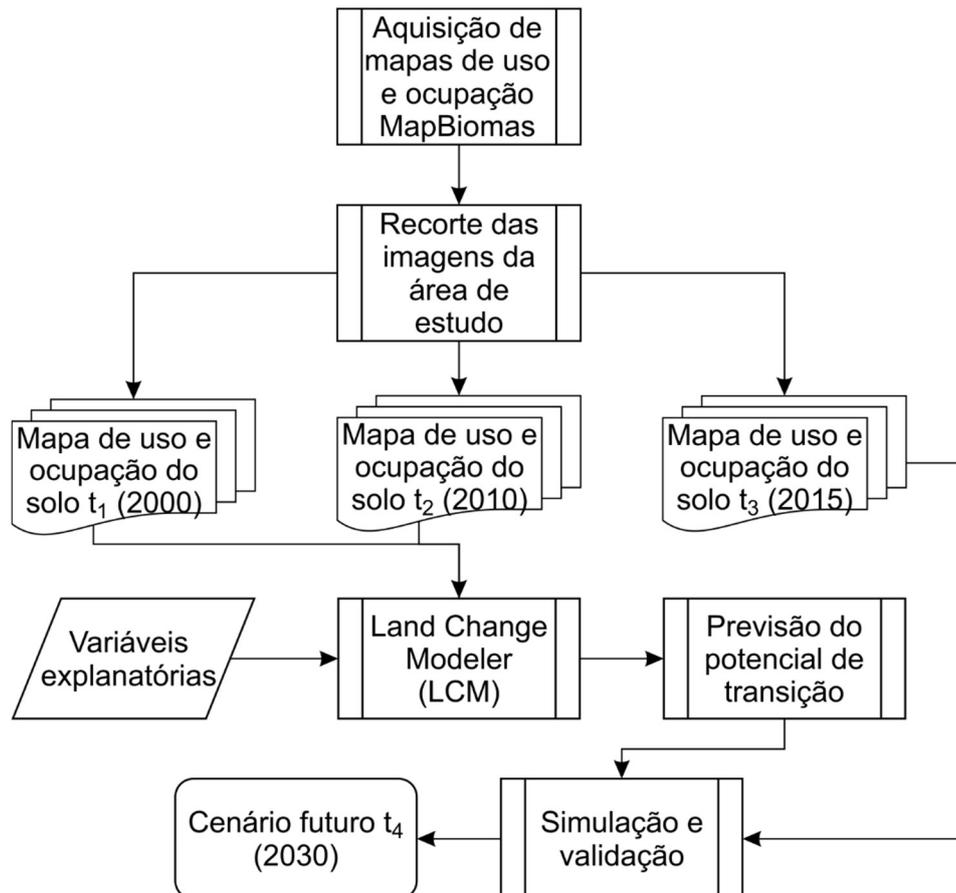


Figura 7 – Procedimentos metodológicos utilizados na predição dos cenários de uso do solo.

2.1. Geração de Imagens Classificadas e Predição da Mudança do Uso e Ocupação do Solo pelo Land Change Modeler (LCM)

Para analisar as mudanças do uso e ocupação do solo na bacia do reservatório Epitácio Pessoa, para os anos de 2000, 2010 e 2015, foram utilizados os mapas de uso e ocupação do solo do projeto MapBiomias que tiveram suas classes de cobertura do solo adaptadas para a realidade do semiárido paraibano.

O MapBiomass é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. A descrição completa do projeto encontra-se em <http://mapbiomas.org>, os mapas do projeto são produzidos a partir da classificação de imagens dos satélites Landsat, utilizando algoritmos na plataforma *Google Earth Engine*, que oferece uma imensa capacidade de processamento em nuvem, gerando assim um mapa detalhado para cada ano desde o ano de 1985.

O processamento e detecção de mudanças na cobertura e uso nos anos estudados foi realizada pelo Land Change Modeler – LCM, desenvolvido pela *Clark Labs*, com o apoio da comissão do Centro Andes de Conservação da Biodiversidade e Conservação Internacional (*Center Andes Biodiversity Conservation of Conservation International*). Esse método foi apresentado em 2006 e integrado ao software IDRISI, versão Andes, com o objetivo de auxiliar análises de mudanças de cobertura do solo com projeções de cenários futuros (DEUS, 2013).

De acordo com Luiz (2014), o LCM em sua versão atual, acoplado ao IDRISI TerrSet, é o resultado da adaptação do *The Land Change Modeler for Ecological Sustainability*. Atualmente, o LCM também pode ser incorporado como módulo adicional ao software ArcGIS. Dessa forma, para a simulação dos cenários de uso e ocupação do solo para o ano de 2030 na bacia do reservatório Epiácio Pessoa, foi utilizado o LCM integrado ao IDRISI TerrSet. O LCM no IDRISI TerrSet é composto por cinco tarefas principais: (a) Análise de mudanças; (b) Potenciais de transição; (c) Previsão de mudança; (d) Planejamento e (e) Projeto de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD, sigla do inglês *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*).

Neste trabalho foram utilizadas as seguintes opções para a predição dos cenários de uso e ocupação do solo para o ano de 2030, que segundo Eastman (2016) são: (a) análise de mudanças: analisa a mudança da cobertura do solo nos anos 2000 (t_1) e 2010 (t_2); (b) potenciais de transição: modelagem dos potenciais de transição da cobertura do solo; e (c) previsão de mudança: predição da mudança da cobertura do solo.

A Figura 8 apresenta a metodologia utilizada na predição do uso e ocupação do solo para t_4 (2030) para a bacia do reservatório Epiácio Pessoa usando o LCM, sendo composta basicamente pelas etapas de previsão do potencial de transição e simulação e validação, em

que os principais dados de entrada foram: (a) mapa de uso do solo do ano 2000 (t_1), (b) uso do solo do ano 2010 (t_2), (c) variáveis explanatórias e (d) mapa de uso do solo do ano de 2015 (t_3), sendo este último mapa usado na etapa de validação da simulação para o ano de 2015 (t_3).

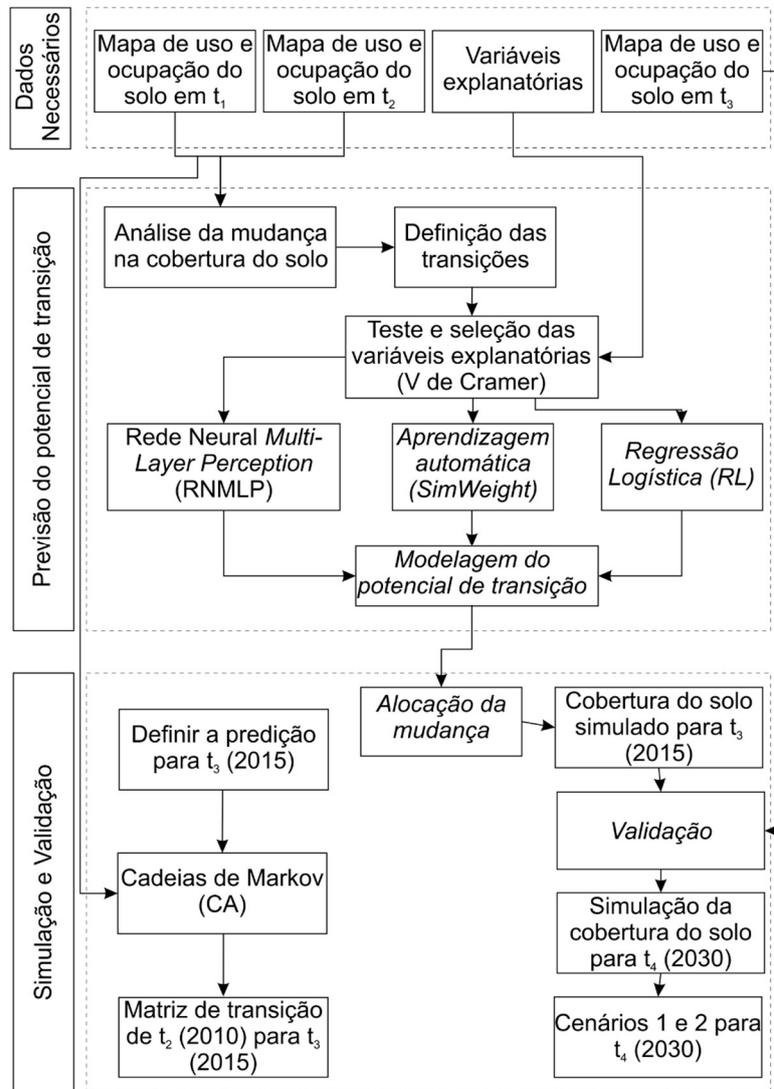


Figura 8 – Metodologia para predição do uso e ocupação do solo para t_4 (2030) para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa usando o LCM do Idrisi TerrSet.

Fonte: Adaptado de Luiz (2014).

2.2. Previsão do potencial de transição

A etapa de previsão do potencial de transição foi composta por: (a) análise da mudança na cobertura do solo, (b) definição das transições, e (c) teste e seleção das variáveis explanatórias. Após a seleção das variáveis explanatórias através do teste V de Cramer, foram testadas três metodologias para a modelagem do potencial de transição para t_3 (2015): (a) Rede Neural Multi-Layer Perceptron (RNMLP), (b) Algoritmo de Aprendizagem

Baseado em Instâncias Ponderadas por Similaridade (*Similarity-Weighted Instance-Based Machine Learning Algorithm –SimWeight*), e (c) Regressão Logística (RL).

2.3. Análise da mudança na cobertura do solo e definição das transições

A análise das mudanças na cobertura do solo pelo LCM foi realizada com base nos mapas de uso e ocupação do solo para os tempos t_1 (2000) e t_2 (2010). Assim, foram gerados o gráfico de perdas e ganhos por categoria de uso e ocupação do solo e o mapa das áreas de mudanças e persistência. Esses mapas serviram como subsídio para a definição das transições, isto é, para definição das mudanças de uma determinada classe para outra.

A partir do gráfico de perdas e ganhos, foi possível identificar a diminuição ou aumento de área de cada classe de uso e ocupação do solo. O mapa de mudança e persistência apontou as áreas que mudaram de uma classe para outra, e as áreas que não sofreram mudanças no uso e ocupação do solo.

As transições no LCM foram definidas com base nas mudanças observadas no uso e ocupação do solo em t_1 (2000), t_2 (2010) e t_3 (2015). Dessa maneira, para modelagem do potencial de transição, foram escolhidas as seguintes transições: (a) Agricultura/pastagem para Caatinga, (b) Agricultura/pastagem para Infraestrutura urbana, (c) Formação florestal para Caatinga, e (d) Caatinga para Infraestrutura urbana. Essas transições foram escolhidas, em razão da diminuição das áreas ocupadas pela classe de vegetação arbustiva para expansão de áreas destinadas à pecuária, agricultura e área urbana identificadas ao longo dos anos (t_1 , t_2 e t_3).

2.4. Teste e seleção das variáveis explanatórias

Para avaliar as variáveis que mais influenciam no processo de mudança no uso e ocupação do solo na área de estudo, o LCM elege e seleciona as variáveis explanatórias, que são analisadas pelo teste V de Cramer. Esse teste é baseado em uma análise estatística não paramétrica, utilizada para medir a força de associação entre variáveis que influenciam nas mudanças no uso do solo (LIEBERTRAU, 1983; SAMPAIO, 2014; LUIZ, 2014). Por meio desse teste, foi possível verificar a associação das variáveis explanatórias com as transições definidas. O teste V de Cramer é obtido pela Equação 3 (LIEBERTRAU, 1983):

$$V = \sqrt{\frac{x^2}{n(q-1)}} \quad (3)$$

em que: x^2 = coeficiente Qui-quadrado:

$$x^2 = \frac{(O - E)^2}{2} \quad (4)$$

sendo: V = índice V de Cramer; n = tamanho da amostra; q = menor valor das linhas e colunas da imagem da cobertura do solo; O = frequência observada para uma categoria e E = frequência esperada na categoria correspondente.

O V de Cramer varia entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 1, maior é a associação entre a variável explanatória e a transição definida. Se o valor V de Cramer das variáveis for maior que 0,15, demonstra que a variável é significativa para a modelagem e deve ser adicionada na etapa de previsão do potencial de transição (SAMPAIO, 2014; HAMDY et al., 2017 e AMORIM, 2015). Dessa forma, apenas as variáveis explanatórias com valores V de Cramer superiores a 0,15 foram utilizadas na modelagem da predição do uso e ocupação do solo na área de estudo.

As variáveis explanatórias correspondem aos fatores que podem influenciar na mudança do uso do solo na bacia, por exemplo: altitude, distância de cursos d'água, distância de rodovias, distância de núcleos urbanos, tipos de solo, declividade, dentre outras. Segundo Sangermano et al. (2012), as principais variáveis que influenciam na tendência das mudanças são (a) a distância de rodovias, (b) cursos de água, (c) áreas urbanas, (d) declividade, e (e) modelo digital do terreno.

Baseada nas mudanças do uso e ocupação do solo na bacia e no conhecimento da área de estudo, foram testadas as seguintes variáveis explanatórias: (a) distância de rodovias; (b) distância de cursos d'água e reservatórios; (c) distância de áreas urbanas; (d) declividade; e (e) altitude.

3. AQUISIÇÃO, TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO

Para a análise da precipitação, inicialmente partiu-se da etapa de identificação dos postos pluviométricos na área de estudo e a aquisição dos dados. Para isto, foram coletados dados do Portal HidroWeb, que é um sítio eletrônico do Sistema Nacional de Informações sobre recursos Hídricos (SNIRH). Esse portal contém todos os dados coletados pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), tais como nível fluvial, vazão, precipitação, qualidade da água e sedimentos¹.

3.1. Tratamento dos dados

Após a aquisição dos dados pluviométricos dos 29 postos inseridos na área de estudo, os mesmos foram organizados e em seguida foram analisadas a consistência das informações dos mesmos, o período de dados existentes para cada posto, bem como a identificação de falhas nas séries pluviométricas, como será visto mais adiante.

Em seguida, os dados foram organizados em planilha eletrônica do Microsoft Excel[®], no qual foi possível realizar a identificação do período de dados de cada posto pluviométrico, bem como a quantidade de falhas presente². Essas falhas podem ocorrer devido a algum erro de leitura ou preenchimento da planilha, falhas na transposição do formato físico para o digital, bem como a não coleta do dado (DANTAS, 2016).

O preenchimento de falhas foi realizado utilizando o método da Ponderação Regional, que preenche as falhas utilizando a ponderação com base nos dados de três postos vizinhos. Para tanto é necessário que os postos sejam de altitudes e regiões climatológicas semelhantes, e que possuam uma série de dados de no mínimo 10 anos (OLIVEIRA et al., 2010; SILVA et al., 2010). Esse método é expresso pela Equação 5:

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_x}{N_i} P_i \quad (5)$$

¹ O portal pode ser acessado no endereço eletrônico www.snirh.gov.br/hidroweb.

² Neste estudo, entende-se a falha como sendo a ausência de informação em respectivo dia na série de dados.

sendo P_x = precipitação anual da estação a ter a falha na série preenchida (mm), P_i = precipitação anual da estação vizinha de ordem “i” para o ano em que se verificou a falha (mm), N_x e N_i = precipitações médias anuais dos postos a ter a falha na série preenchida e do vizinho de ordem “i”, respectivamente (mm), e n = número de postos vizinhos.

O método da ponderação regional foi escolhido, pois vem sendo aplicado com bons resultados como apresentado por Oliveira et al. (2010), que realizaram estudo comparando vários métodos para o preenchimento de falhas em dados de precipitação e a partir dos resultados obtidos para as estações avaliadas. Esses autores destacaram que o método da ponderação regional e o de regressão linear apresentaram desempenhos melhores no preenchimento de falhas em relação a outros métodos analisados.

Após a etapa de preenchimento de falhas foram realizados ainda alguns testes para determinar a qualidade dos dados a partir da criação de gráfico do tipo *boxplot* para identificar os *outliers* representados por + na Figura 9 que indicam quando existem observações atípicas, valores discrepantes ou extremos.

A análise do gráfico *boxplot* possibilitou a exclusão de onze postos pluviométricos por apresentarem informações diferenciadas das encontradas nos outros postos. Em seguida os dados foram analisados a partir de um dendograma, onde pode-se observar a similaridade entre os postos pluviométricos (Figura 10). O resultado desse gráfico indicou que cinco dos dezoito postos utilizados não possuíam similaridade com os.

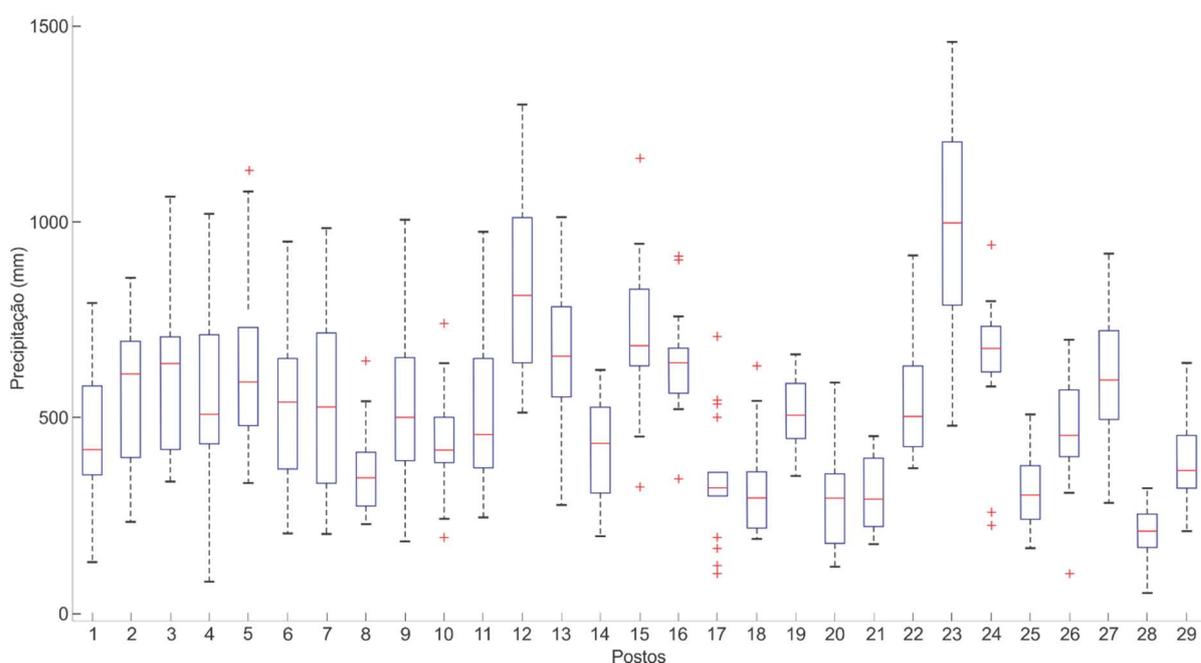


Figura 9 – *Boxplot* dos postos pluviométricos utilizados neste estudo.

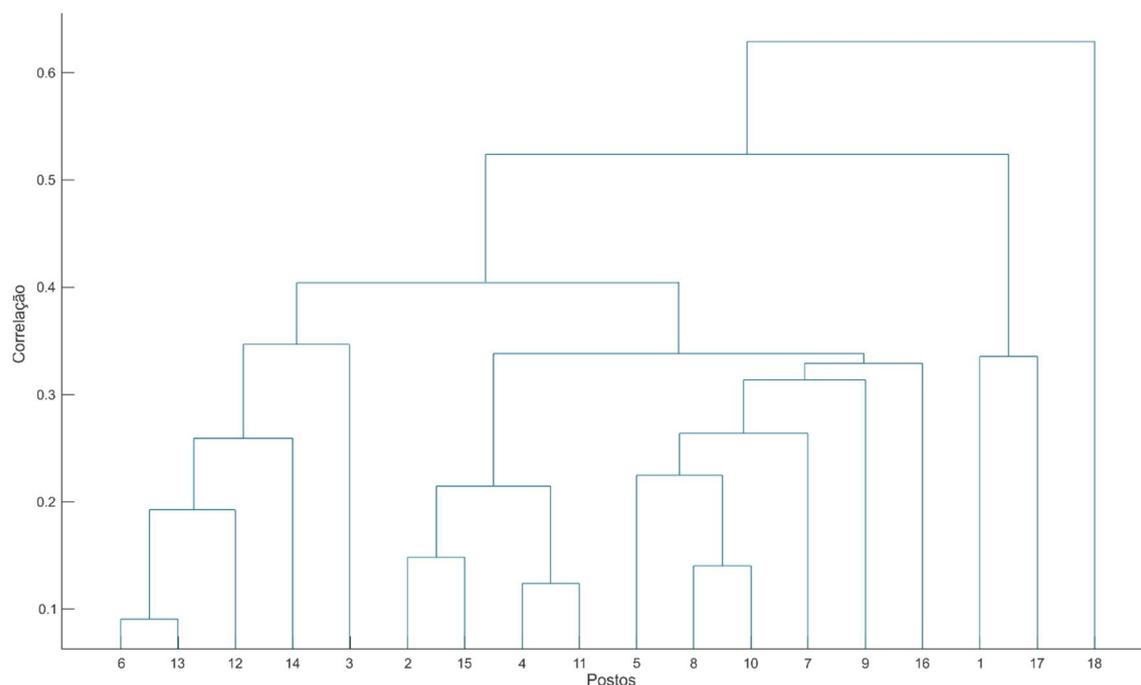


Figura 10 – Dendrograma de similaridade entre os dados dos postos pluviométricos.

Foram selecionados ainda dois postos fluviométricos inseridos na bacia. As séries de vazão desses postos foram utilizadas nos processos de calibração e validação do modelo hidrológico. A Tabela 2 apresenta a descrição dos postos pluviométricos e fluviométricos utilizados e a Figura 11 apresenta a distribuição espacial destes postos.

Tabela 2 - Postos pluviométricos selecionados após análise inicial de consistência dos dados

	Código	Nome	Longitude	Latitude	Altitude	
Precipitação	P1	736008	Soledade	-36,37	-7,07	560
	P2	736009	Serra Branca	-36,67	-7,48	450
	P3	736011	São José dos Cordeiros	-36,82	-7,38	610
	P4	736014	Pocinhos	-36,07	-7,07	624
	P5	736016	Gurjão	-36,48	-7,27	480
	P6	736017	Coxixola	-36,62	-7,62	465
	P7	736018	Congo	-36,67	-7,80	500
	P8	736020	Caraúbas	-36,52	-7,72	460
	P9	736021	Camalaú	-36,87	-7,92	565
	P10	736022	Cabaceiras	-36,28	-7,60	390
	P11	736025	Barra de São Miguel	-36,33	-7,75	520
	P12	737004	Prata	-37,10	-7,68	600
	P13	737018	Desterro	-37,10	-7,28	590

		Código	Nome	Longitude	Latitude	Altitude
Vazão	V1	38830000	Caraúbas	-36,50	-7,72	493
	V2	38850000	Poço de Pedras	-36,43	-7,40	430

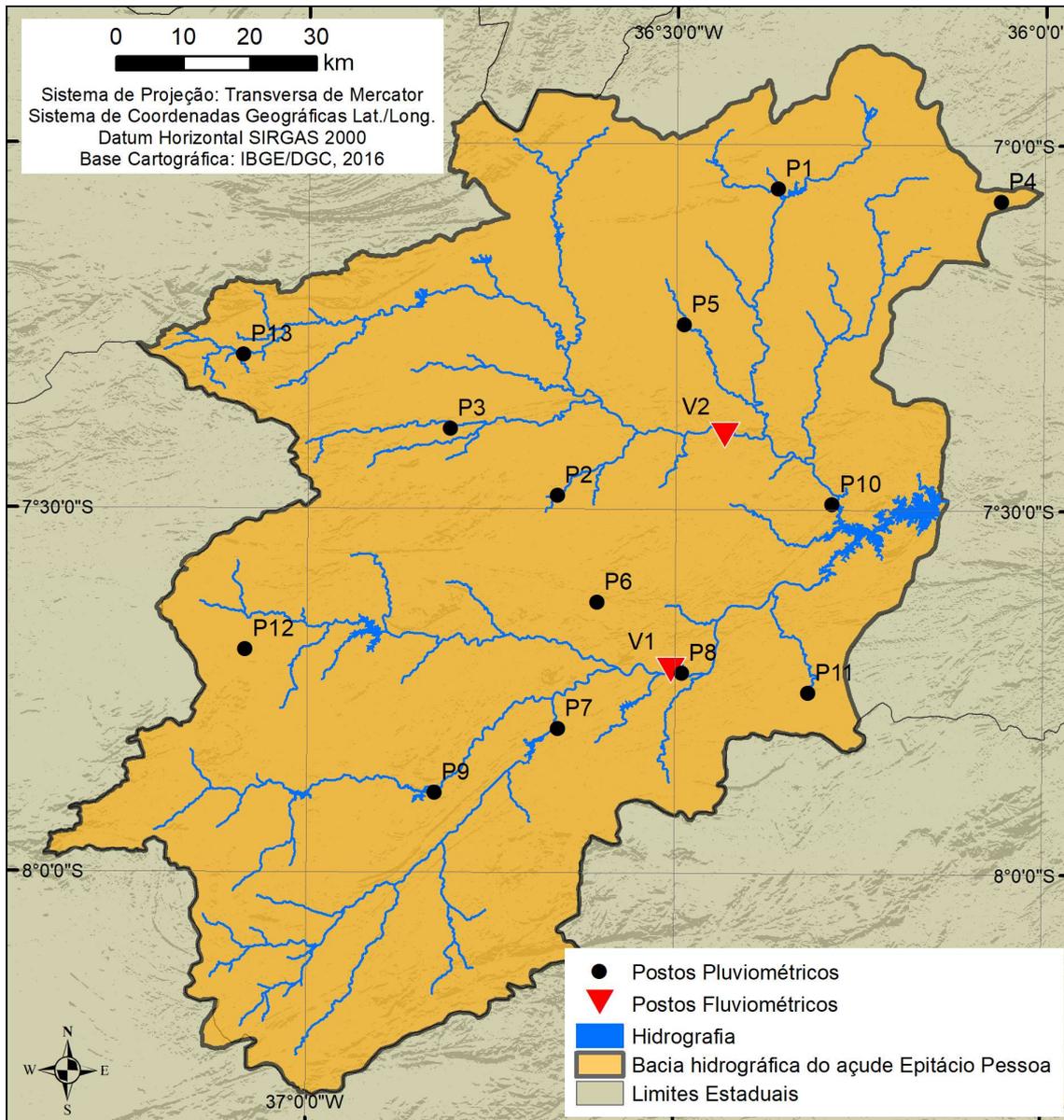


Figura 11 - Postos pluviométricos e fluviométricos utilizados.

3.2. Análise espacial da precipitação

Após a aquisição e análise dos dados de precipitação, seguiu-se com a análise espacial da precipitação, que é o processo de manipulação de informações espaciais para extrair novas informações e significados a partir dos dados originais. A interpolação de

dados é de suma importância para que seja verificada a distribuição espacial dos mesmos (MARCUIZZO et al., 2011). Assim, foram gerados mapas utilizando as precipitações máximas, mínimas e médias anuais de cada posto pluviométrico com o objetivo de identificar a distribuição das chuvas na área de estudo.

Para realizar a distribuição dos dados de precipitação usando interpolação espacial foi utilizado o interpolador conhecido como Inverso da Distância Ponderada – *Inverse Distance Weighted* (IDW), sendo expresso por (Equação 6):

$$f(x, y) = \frac{\sum_{j=1...N} w(d_j)v_j}{\sum_{j=1...N} w(d_j)} \quad (6)$$

sendo N o número de dados, v_j o valor do ponto j, d_j a distância entre os valores do ponto j, e $w(d)$ a função de ponderação. Para obter o valor de $w(d)$ é utilizada a equação 7.

$$w(d) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{d_{min}^2} \text{ se } d_{min} \leq d_{min} \\ \frac{1}{d^2} \text{ se } d_{min} < d < d_{max} \\ 0 \text{ se } d > d_{max} \end{array} \right\} \quad (7)$$

sendo d_{min} a distância mínima e d_{max} a distância máxima. O d_{min} impede que aconteçam valores com $d = 0$ e o d_{max} evita o uso de pontos muito distantes.

Optou-se pela utilização do interpolador IDW, pela sua eficiência para a interpolação espacial da precipitação (MAGALHÃES et al., 2013). A interpolação usando o IDW é baseada na distância ponderada de pontos amostrais, ou seja, a superfície interpolada por esse método é criada com base na utilização de um coeficiente de ponderação que controla a estimativa de valores dos pontos amostrais da base espacial.

A principal vantagem desse método é a simplicidade, apresentando bons resultados para uma ampla variedade de dados, não havendo problemas para os resultados que excedem a faixa de valores significativos (CARUSO e QUARTA, 1998). Esse método baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um indivíduo do outro,

maior será a correlação desse indivíduo com seus vizinhos. A espacialização da precipitação usando o IDW foi realizada usando o software ArcGIS 10.1®.

4. TENDÊNCIAS DA PRECIPITAÇÃO E VARIABILIDADE CLIMÁTICA

Nos últimos anos a variabilidade climática vem sendo cada vez mais objeto de estudo de trabalhos e pesquisas, demonstrando um profundo interesse do meio técnico-científico na dinâmica das fases do ciclo hidrológico (ALMEIDA et al., 2014; LIMA et al., 2011; MESCHIATTI e PENEREIRO, 2011; SILVA e SANTOS et al., 2015).

No que tange a variabilidade climática, pode-se encontrar uma gama extensa de definições a respeito do termo, tendo em vista principalmente a proximidade com outro termo bastante discutido que são as mudanças climáticas. Para este trabalho foram adotadas as seguintes terminologias (TUCCI, 2002):

- Mudanças climáticas: são as alterações da variabilidade climática devido as atividades humanas;
- Variabilidade climática: é a terminologia utilizada para as variações de clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações.

As pesquisas envolvendo esses temas ainda são bastante restritas, como a de Pinto et al. (1989), que realizaram uma avaliação da variabilidade climática ao longo do tempo no Brasil e mostraram que, dependendo da região analisada, podem ocorrer alterações contínuas ou ciclos bem demarcados dos elementos meteorológicos, como as temperaturas e as precipitações.

Nobre e Melo (2003) destacam que a variabilidade da pluviometria associada aos baixos totais anuais pluviométricos sobre o Nordeste do Brasil é um dos principais fatores para a ocorrência dos eventos de “secas” sobre a região, caracterizadas por uma acentuada redução do total pluviométrico sazonal durante o período de fevereiro a maio.

De acordo com Magalhães e Glantz (1992), a seca é associada a grandes modificações sociais, de recursos financeiros e econômicos, mas que de fato, é a variabilidade espacial e temporal das chuvas na escala de tempo intrasazonal que atinge a sociedade de forma mais contundente.

Uliana et al. (2015) afirmam que a detecção de tendências em séries de vazão e precipitação apresenta uma expressiva importância para a gestão de recursos hídricos. Eles avaliaram a significância das tendências em séries temporais de vazão e precipitação mensal e anual, correspondentes ao período de 1939 a 2005. Utilizaram o teste de Pettitt e identificaram uma mudança de tendência positiva na vazão média mensal de 34,2% no mês de outubro a partir do ano de 1963. Segundo os autores, o teste de Pettitt apresentou resultados satisfatórios para a detecção de tendências nas séries históricas.

Os métodos não paramétricos de Mann-Kendall e Sen foram utilizados por Silva et al. (2015) para identificar se houve tendência positiva ou negativa em dados de precipitação diária de oito postos meteorológicos na bacia do rio Cobre, ao sul de Portugal, para o período de 1960 a 2000. A análise aplicada a série temporal indicou que a precipitação é altamente variável temporalmente e que há uma diminuição na quantidade anual de chuvas para o período estudado.

Meschiatti e Penreiro (2011) utilizaram os testes de Mann-Kendall e Pettitt para analisar as variabilidades e as tendências nos índices anuais de precipitação pluviométrica e temperatura média em dez municípios do estado de São Paulo. Os testes encontraram uma inversão de tendência ou “quebra de tendência” em sete municípios. Foram encontradas apenas duas tendências de precipitação e cinco tendências para as temperaturas médias.

Almeida et al. (2014) utilizaram dados pluviométricos de 45 municípios do estado de São Paulo com séries de 30 anos (1977–2006), a fim de detectar possíveis tendências na precipitação pluvial. Os testes não paramétricos de Kruskal-Wallis e Friedman foram utilizados para identificar as precipitações diárias máximas usando o conjunto das precipitações diárias máximas, e o Mann-Kendall para avaliar a existência de tendências para cada estação isoladamente. Dos 45 municípios estudados, 15 apresentaram tendência positiva para as precipitações diárias máximas.

Os métodos estatísticos de tendências têm como pressuposto a independência dos dados, somente assim, podem testar a existência de correlação entre os mesmos, assegurando dessa forma, a confiabilidade dos resultados (LIMA et al., 2005).

As técnicas de estatística descritiva apresentam a posição central dos dados (mediana) e se há simetria ou assimetria, além de mostrar os valores extremos, ou seja, os valores que apresentam grande variabilidade em relação ao restante ou se são inconsistentes com base nos valores da série, o que ajuda no melhor entendimento da distribuição. Entre os

diversos métodos de análise de tendência, neste estudo optou-se pela aplicação de três métodos não paramétricos: (a) teste de Mann-Kendall (KENDALL, 1976; MANN, 1945), sugerido pela Organização Meteorológica Mundial, (b) teste de Sen (SEN, 1968), também conhecido como declividade de Sen, que define a magnitude dessa tendência, e (c) teste de Pettitt (PETTITT, 1979) que localiza o ponto onde houve uma mudança brusca na média da série temporal.

O método de Mann-Kendall é aplicado nos casos em que os valores de dados x_i de uma série temporal podem obedecer ao modelo (Equação 8).

$$x_i f(t_i) + \varepsilon_i \quad (8)$$

sendo $f(t_i)$ um aumento ou diminuição da função monótona e ε_i os resíduos assumidos como sendo a mesma distribuição com média igual à zero. Em seguida, assume-se que a variância da distribuição é constante.

Nesse método é testada a hipótese nula (H_0), ou seja, as observações x_i são ordenadas aleatoriamente, contra a hipótese H_1 , que apresenta tendência (SALMI et al., 2002). Em seguida é calculada a variância S pela equação 9.

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^P t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (9)$$

no qual n é o número de valores de dados, P representa o número de grupos com dados repetidos, e t_i é o número de valores de dados do i -ésimo grupo. Os valores de S são utilizados para calcular o teste Z_S (Equação 10).

$$Z_S = \left\{ \begin{array}{l} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, \text{ se } S > 0 \\ 0, \text{ se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, \text{ se } S < 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

A presença de tendência é então avaliada pelo valor de Z_5 . Um valor positivo indica uma tendência ascendente, assim como, um valor negativo corresponde a uma tendência descendente. Pode-se verificar então que sempre irá existir tendência, seja ela negativa ou positiva, porém, deve-se observar o nível de significância para determinar se a informação é válida ou não, indicada pelo resultado do *p-value* (α), que pode variar de 1 (um) a 0 (zero), sendo o zero o valor ideal. Trabalhos como os de Caloiero et al. (2016), Limeira et al. (2012), Lopes; Silva (2013), Salviano et al. (2016), Silva et al. (2015b) e Zelenáková et al. (2016) adotaram o *p-value* superior a 0,05 para determinar o nível de significância dos resultados das tendências. Nesta pesquisa foram adotados níveis de significância superiores a 0,1. Os resultados foram então convertidos em valores percentuais, passando a ser considerados como níveis de confiança.

O outro método de tendência não paramétrico utilizado foi o teste de Sen, que estima a inclinação de uma tendência. Esse método é calculado com base na equação 11.

$$f(t) = Q + B \quad (11)$$

sendo Q a declividade e B uma constante.

Para se obter a estimativa da inclinação dada na equação acima, faz-se necessário calcular a inclinação de todos os pares de dados (Equação 12).

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ para } j > k \quad (12)$$

no qual x_j e x_k são os valores de x nos períodos j e k , respectivamente, com $j > k$. Se existem n valores x_j na série temporal, obtêm-se $N = n(n-1)/2$ estimativas de inclinação Q_i . Assim a inclinação estimada pelo método de Sen é a mediana destes valores N de Q_i . Os valores N de Q_i são classificados do menor para o maior e a estimativa de Sen é dada pela equação 13:

$$Q = Q_{[(N+1)/2]}, \text{ se } N \text{ é ímpar ou } Q \frac{1}{2} (Q_{[N+2]} + Q_{[(N+2)/2]}), \text{ se } N \text{ é par} \quad (13)$$

Para estimar B na Equação 9 são calculados os n valores da diferença $x_i - Q_{ti}$. Em seguida são calculados os intervalos de confiança em dois níveis diferentes no intuito de assegurar a confiabilidade do teste, onde $\alpha = 0,01$ (99%) e $\alpha = 0,05$ (95%). O método de Sen também possibilita identificar se houve, ou não, mudança de tendência e a magnitude da mesma, sendo uma técnica muito utilizada para esse tipo de análise (FERRARI, 2012).

O teste não paramétrico de Pettitt (PETTITT, 1979) localiza o ponto onde houve uma mudança brusca na média da série temporal, com base em duas amostras provenientes de populações iguais, sendo capaz de fornecer informações sobre a homogeneidade dos dados (ULIANA et al., 2015). Esse é um teste não paramétrico que utiliza uma versão da estatística U_t, N , do teste de Mann-Whitney, a qual verifica se duas amostras x_1, \dots, x_t e x_{t+1}, \dots, x_N , são da mesma população ou não. O teste não paramétrico de Pettitt é calculado usando as equações 14 e 15.

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_t - x_j) \text{ para } t = 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

em que

$$\text{sgn} = (x) \begin{cases} 1 \text{ se } x > 0 \\ 0 \text{ se } x = 0 \\ -1 \text{ se } x < 0 \end{cases} \quad (15)$$

A realização das análises combinando os testes de Mann-Kendall, Sen e Pettitt foram necessárias para que fossem identificadas a existência de tendência na série de dados e para localizar quando ela passou a existir (PENEREIRO e ORLANDO, 2013).

5. MODELAGEM HIDROLÓGICA

Uma ferramenta importante para auxiliar pesquisas com bacias hidrográficas é a modelagem hidrológica. Os modelos hidrológicos são ferramentas que auxiliam no melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Sua aplicação é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos do ciclo hidrológico, o que tem alavancado o desenvolvimento de vários modelos como o Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS), o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), o

Water Erosion Prediction Project (WEPP), o Watershed Erosion Simulation Program (WESP), dentre outros (TUCCI et al., 2002).

De acordo com Blainski et al. (2011), na gestão de bacias hidrográficas os modelos matemáticos constituem ferramentas de predição dos impactos oriundos da ocupação do solo sobre a quantidade e qualidade da água. Em seu estudo foi utilizado o modelo SWAT na simulação do regime hidrológico da bacia do rio Araranguá, quantificando os impactos de diferentes cenários de uso do solo sobre a distribuição de vazão, e os resultados apontaram que os dados simulados representam satisfatoriamente os dados medidos.

Santos (2011) avaliou as perdas de água e solos na região semiárida do estado da Paraíba através de chuva simulada e modelagem hidrossedimentológica. Os dados obtidos a partir das chuvas simuladas e do monitoramento hidrossedimentológico realizado nas parcelas de erosão foram modelados pelo WESP. Os resultados da relação entre os dados observados e os dados simulados no modelo foram bastante satisfatórios.

Marchioro (2008) utilizou o SWAT para simular a vazão e a produção de sedimentos da bacia do córrego Santa Maria, no noroeste fluminense, considerando as variáveis de uso/ocupação e tipo de solo e após a calibração e validação dos dados, criou cenários alternativos, levando em consideração o Código Florestal Brasileiro e aponta o SWAT como sendo uma importante ferramenta para simular medidas buscando uma melhoria da qualidade ambiental na bacia.

O SWAT será utilizado nesta pesquisa devido a sua capacidade de simular e espacializar os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, considerando diversos fatores como clima, hidrologia, uso e ocupação do solo, integrando-os em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), possibilitando o estudo da influência e dos impactos de cenários de uso do solo e mudanças climáticas.

5.1. O Modelo SWAT

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) e *Agricultural Research Service* (ARS), e aperfeiçoado por Arnold et al. (2012), para prever o efeito da qualidade da água, da produção de sedimentos e da carga de poluentes em bacias hidrográficas. O modelo SWAT se integra ao SIG por meio de uma extensão, denominada ArcSWAT, desenvolvida para o software ArcGIS®, da *Environmental*

Systems Research Institute (ESRI), que é utilizada para a preparação dos dados de entrada para o modelo SWAT, ou seja, a interface ArcSWAT é responsável pelo processamento de dados para a execução do modelo hidrológico SWAT e utiliza para isso diversas ferramentas nativas do ArcGIS®. A interface ArcSWAT pode ser obtida por meio do endereço eletrônico <http://swat.tamu.edu/software/arcsbat>.

O ArcSWAT realiza o pré e pós processamento dos dados para que seja executado o modelo SWAT, a partir do armazenamento de dados geoespaciais, numéricos e de texto (BUARQUE, 2007). Entende-se como dados geoespaciais os arquivos do modelo digital de elevação (MDE), uso e ocupação do solo e tipos de solos, já os dados numéricos e de texto são os dados climáticos e hidrológicos (CARVALHO NETO, 2011).

Entre os componentes desse modelo podem ser destacados: hidrologia, clima, produção de sedimentos, nutrientes, agrotóxicos, temperatura do solo, terra cultivada, práticas de manejo do solo e demais componentes (SILVA et al., 2015). As aplicações do SWAT abrangem análises de capacidade de suporte dos cursos hídricos, avaliação da eficiência de planos integrados para a conservação de recursos hídricos, estudos de influência de cenários de uso do solo na poluição hídrica, estudos de impactos hidrológicos provocados pelas mudanças climáticas, entre outros (SILVA et al., 2015).

O SWAT divide a bacia em sub-bacias com base no relevo, solo e uso do solo, desse modo, preserva os parâmetros espacialmente distribuídos na bacia inteira e as características homogêneas dentro da bacia. Com base nos dados dos parâmetros do meio físico este modelo pode ser aplicado em bacias hidrográficas de médio e grande porte (SILVA, 2010).

O SWAT segue diversos passos (Figura 12) até que sejam gerados os resultados. Inicialmente foram definidas as sub-bacias com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) da área; o segundo passo foi fornecer os mapas de uso e ocupação do solo, tipos de solo e declividade para que o modelo gere as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU); logo após, deve-se disponibilizar a série de dados climáticos ao SWAT para que, assim, seja realizada a simulação. Por fim, com os resultados da simulação, é feita a calibração e validação do modelo para obterem-se resultados mais precisos de vazão.

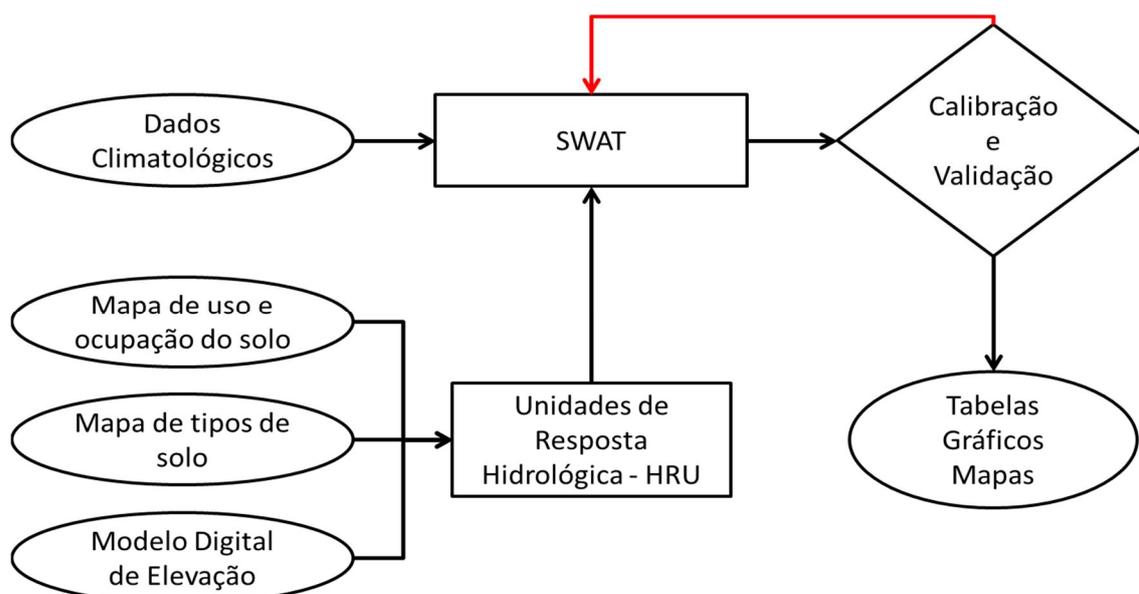


Figura 12 – Diagrama sintético das etapas que constituem o modelo SWAT.
 Fonte: Adaptado de Di Luzio et al. (2002).

5.1.1. 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 Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), que por sua vez, não interagem entre si. 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 Brighenti et al. (2016), o funcionamento do SWAT será sempre função do balanço hídrico existente na bacia hidrográfica, onde é aplicado o conceito das URHs. De acordo com Neitsch et al. (2011), 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, esses são direcionados para a rede de drenagem até atingirem a seção de controle. Posteriormente será detalhado o equacionamento do balanço hídrico pelo modelo SWAT.

Para Ferrigo (2014), o balanço hídrico é a força motriz por trás de todos os processos do SWAT, porque impacta o crescimento da planta e o movimento dos sedimentos, nutrientes, pesticidas e agentes patogênicos, sendo a simulação

hidrossedimentológica realizada pelo modelo dividida 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).

O SWAT requer como dados de entrada várias informações, a saber: precipitação, temperatura, umidade, tipos de solos, relevo e uso e ocupação do solo (SILVA et al., 2013). Esta pesquisa utiliza apenas a simulação das ações de uso e manejo do solo. O modelo SWAT estima o balanço hídrico pela equação 16.

$$SW_t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (16)$$

sendo SW_t o conteúdo final de água no solo (mm), SW o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (mm), t o tempo (dias), R_i a precipitação (mm), Q_i o escoamento superficial (mm), ET_i a evapotranspiração (mm), P_i a percolação (mm), e QR_i o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

5.1.2. 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 a Ampt (1911), utilizado quando existem 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 uma bacia de condutividade hidráulica infinita e 100 a uma bacia totalmente impermeável (BRIGHENTI, 2015). Esse modelo é dado pela Equação 17.

$$Q_{sup} = \frac{(P_d - I_a)^2}{(P_d - I_a + S)} \quad (17)$$

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 terreno, além das condições prévias de umidade (NEITSCH et al., 2011). Sua determinação considera o fator CN, e é dado pela Equação 18 (em unidades métricas):

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (18)$$

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 $P_d > I_a$. Dessa forma, a Equação 19 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q_{sup} = \frac{(P_d - 0,2S)^2}{(P_d + 0,8S)} \quad (19)$$

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 20 e 21.

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

$$CN_{III} = CN_{II} \cdot \exp[0,00673 \cdot (100 - CN_{II})] \quad (21)$$

5.1.3. 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).

5.1.3.1. 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 essa pesquisa foi adotado o método de Penman-Monteith, recomendado por Smith (1991) e também adotado por Castro (2013). O método de Penman-Monteith é dado pela Equação 22.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (22)$$

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), rc é a resistência do dossel da planta, e ra é a resistência aerodinâmica.

5.1.3.2. 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 Equação 23. Quando a precipitação acontece em um determinado dia, o armazenamento do dossel é preenchido antes da água chegar ao solo (SANTOS, 2016).

$$can_{dia} = Canmx \cdot \frac{IAF}{IAFmax} \quad (23)$$

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 $IAFmax$ 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:

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})) (Equação 24).

$$E_a = R_{can} = E_0 \rightarrow R_{int(f)} = R_{int(i)} - E_{can} \quad (24)$$

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

No caso de a evapotranspiração potencial ser superior a quantidade de água armazenada na copa das árvores, então, toda a lâmina interceptada será evaporada, como mostrado na Equação 25.

$$E_{can} = R_{int(i)} \rightarrow R_{int(f)} = 0 \quad (25)$$

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, obedecendo à 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 26.

$$E_{solo,z} = E_z'' \cdot \frac{z}{(z + \exp(2,374 - 0,00713 \cdot z))} \quad (26)$$

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 (Equação 27).

$$E_{solo,ly} = E_{solo,zl} - E_{solo,zu} \quad (27)$$

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 Equação 27 para permitir que o usuário modifique a distribuição da profundidade utilizada para atender a demanda evaporativa do solo, resultando na Equação 28.

$$E_{solo,ly} = E_{solo,zl} - E_{solo,zu} \times esco \quad (28)$$

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 extrair mais água pela demanda evaporativa a partir de camadas mais baixas, como pode ser observado na Figura 13.

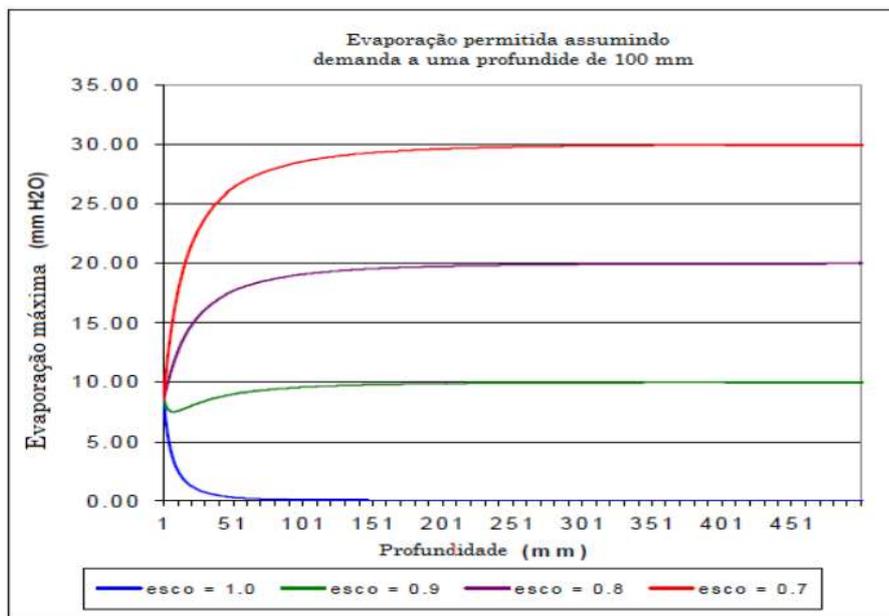


Figura 13 – Distribuição da demanda evaporativa do solo em profundidade.
Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2009).

5.1.4. 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 Equações 29 e 30.

$$SW_{cam,excesso} = SW_{cam} = FC_{cam} \text{ se } SW_{cam} > FC_{cam} \quad (29)$$

$$SW_{cam,excesso} = 0 \text{ se } SW_{cam} \leq FC_{cam} \quad (30)$$

onde $SW_{cam,excesso}$ é 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 31.

$$w_{perc,cam} = SW_{cam,excesso} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta T}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (31)$$

onde $w_{perc,cam}$ 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 32.

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{cam} - FC_{cam}}{K_{sat}} \quad (32)$$

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 33):

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2 \cdot SW_{cam,excesso} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\Phi_d \cdot L_{slp}} \right) \quad (33)$$

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).

5.1.5. 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 34.

$$W_{rec} = \left(1 - \exp \left[\frac{-1}{\delta_{aq}} \right] \right) W_{seep} + \exp \left[\frac{-1}{\delta_{aq}} \right] W_{rec,i-1} \quad (34)$$

no qual 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 isso, o modelo regula a quantidade de água que recarrega o aquífero profundo pelo uso da Equação 35.

$$W_{prf} = \beta_{prf} \cdot W_{rec} \quad (35)$$

onde W_{prf} é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero profundo no dia i e β_{prf} é o coeficiente de percolação do aquífero. Dessa forma, a quantidade de água destinada ao aquífero raso é dado pela Equação 36.

$$W_{rec,rs} = W_{rec} \cdot W_{prf} \quad (36)$$

onde $W_{rec,rs}$ é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero raso no dia i .

Por fim, o balanço hídrico no aquífero raso é dado pela Equação 37.

$$aq_{rs,i} = aq_{rz,i-1} + W_{rec,rs} - Q_{aq} - W_{revap} - W_{bomba,rs} \quad (37)$$

sendo $aq_{rs,i}$ 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}). Esse 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 38.

$$W_{revap,max} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (38)$$

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 definida pelas seguintes condições:

$$W_{revap} = 0 \text{ se } aq_{rs} \leq aq_{lim,rv} \quad (39)$$

$$W_{revap} = W_{revap,max} - aq_{lim,rv} \text{ se } aq_{lim,rv} < aq_{rs} < (aq_{lim,rv} + W_{revap,max}) \quad (40)$$

$$W_{revap} = W_{revap,max} \text{ se } aq_{lim,rv} \geq (aq_{lim,rv} + W_{revap,max}) \quad (41)$$

no qual 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).

5.2. Geração do banco de dados do modelo

Para utilização do modelo SWAT é necessário alimentar o banco de dados com as informações da área de estudo, a partir de informações geoespaciais como o modelo digital de elevação, o mapa de tipos de solos e o mapa de uso e ocupação do solo. Posteriormente são fornecidos ao modelo os dados tabulares com as condições climáticas da área. A seguir serão apresentados, de forma sucinta, os dados de entrada utilizados para realizar a modelagem hidrológica da bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

O modelo digital de elevação – MDE da bacia do reservatório Epitácio Pessoa foi obtido através dos dados da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (INPE, 2015), que realizou um levantamento altimétrico da superfície terrestre com resolução de 90 metros, sendo posteriormente interpolado, gerando um novo modelo, agora com resolução espacial de 30 metros.

A partir do MDE de 30 m, o modelo identificou o direcionamento e a acumulação do fluxo de escoamento superficial no terreno, gerou a rede hidrográfica, as sub-bacias e os seus exutórios e delimitou a bacia hidrográfica a partir da informação do seu exutório. Calculou ainda os parâmetros relacionados à topografia de cada sub-bacia. A Figura 14 apresenta os resultados desse procedimento.

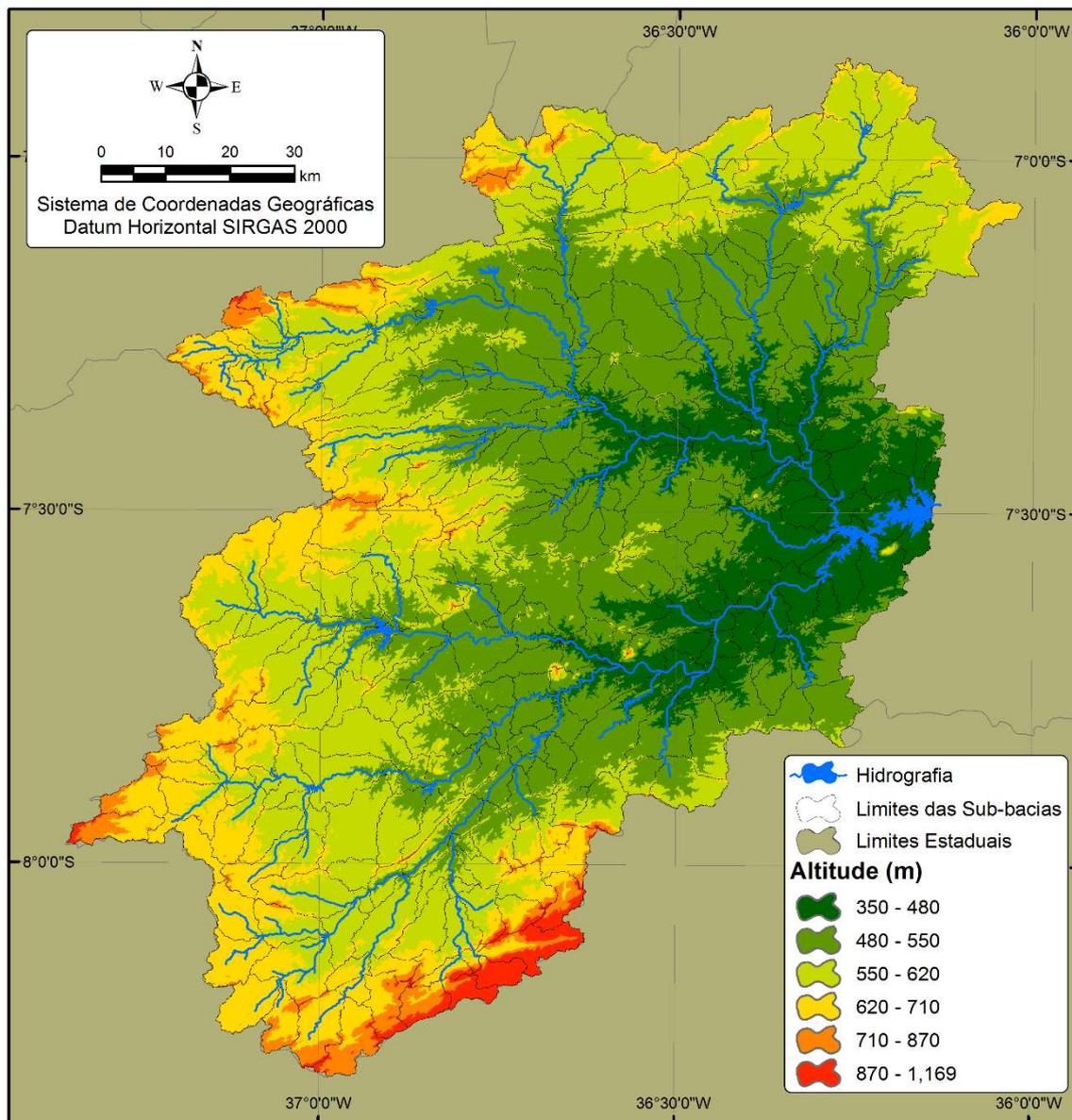


Figura 14 – Sub-bacias e altimetria da bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa.

As informações de uso do solo na bacia foram obtidas a partir da imagem do Globcover 2009, projeto coordenado pela Agência Espacial Europeia (ESA). Esse projeto realizou um mapeamento do uso e cobertura vegetal global em escala regional, com resolução espacial de 300 m.

O mapeamento do Globcover 2009 foi obtido com base na classificação automática das séries temporais do sensor MERIS no ano de 2009 (BICHERON *et al.*, 2008). Shimabukuro et al. (2013) avaliaram a qualidade das imagens de uso e cobertura da terra produzidas pelo Globcover para o estado do Mato Grosso onde foi realizada uma comparação com os mapas de vegetação do RadamBrasil em 1982-1984, imagens do MODIS e imagens

do Google Earth. Os resultados apontam para uma exatidão geral de 47% em relação ao observado nas outras imagens e até 75% para classes analisadas separadamente.

Por ser uma classificação global, foi necessário um levantamento em campo na área de estudo desta pesquisa para verificar e adequar a classificação do levantamento global para a escala local. Os resultados destes procedimentos são apresentados na Tabela 3 e Figura 15, que mostram as classes de uso do solo identificadas na imagem, a área total e o percentual de ocupação de cada classe de uso na bacia.

Tabela 3 - Área e percentual de uso do solo na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

Uso do Solo	Área	
	km ²	%
Solo Exposto	4,94	0,04%
Corpos de Água	29,64	0,24%
Vegetação Arbórea	125,99	1,02%
Agricultura	681,81	5,52%
Vegetação Arbóreo-Arbustiva	1.790,98	14,50%
Vegetação Herbácea	1.887,32	15,28%
Pastagem	3.409,04	27,60%
Vegetação Arbustiva	4.423,10	35,81%
Total	12.352,82	100,00%

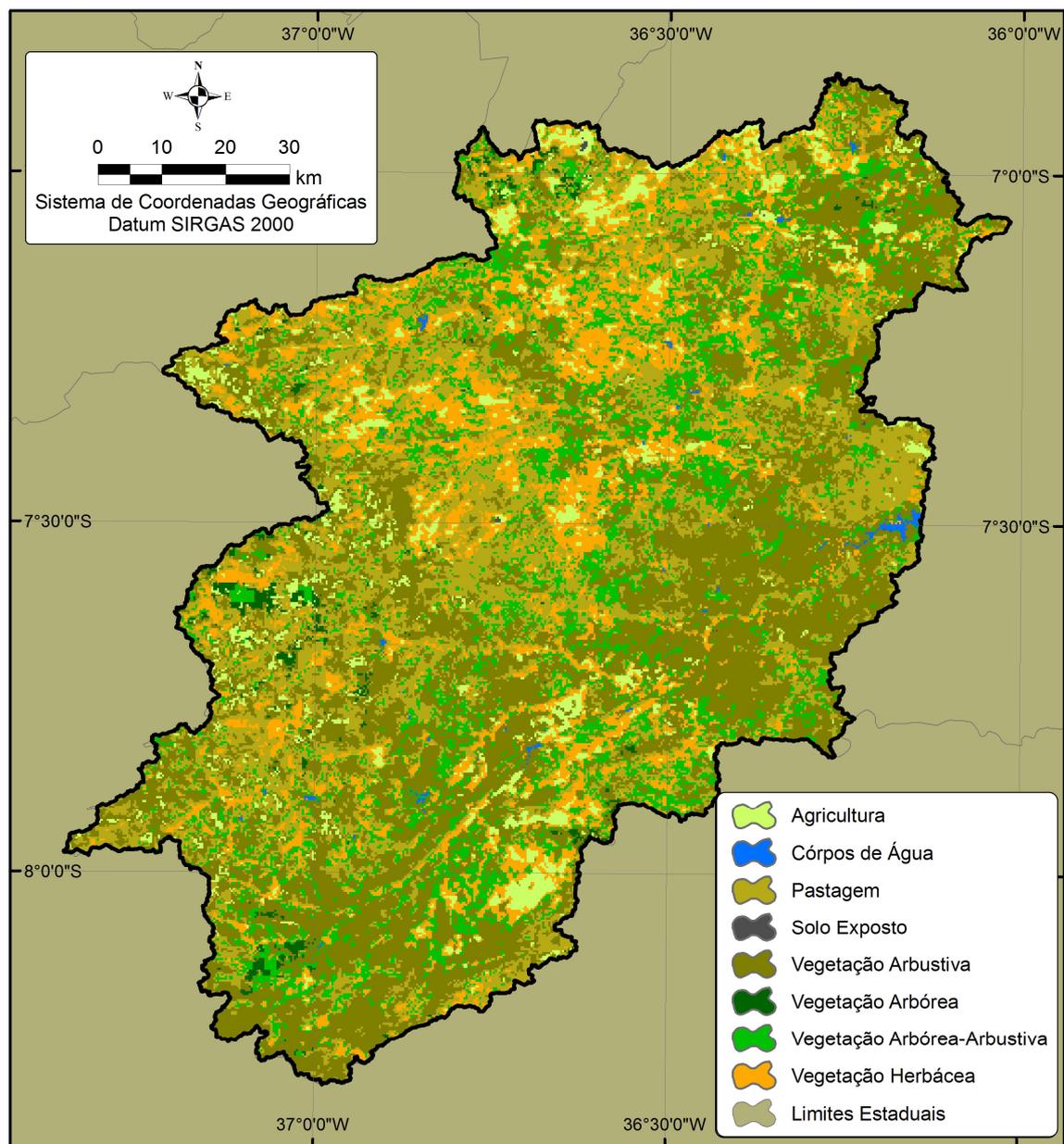


Figura 15 – Uso do solo na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

A Figura 16 apresenta a distribuição espacial dos tipos de solos na área de estudo e a Tabela 4 exhibe as características dos solos existentes na bacia. O mapa de tipos de solo e os parâmetros físicos dos solos para a bacia foram obtidos junto ao Sistema de Informação de Solos Brasileiros (EMBRAPA, 2014), que fornece um banco de dados espacial com informações sobre os solos do Brasil.

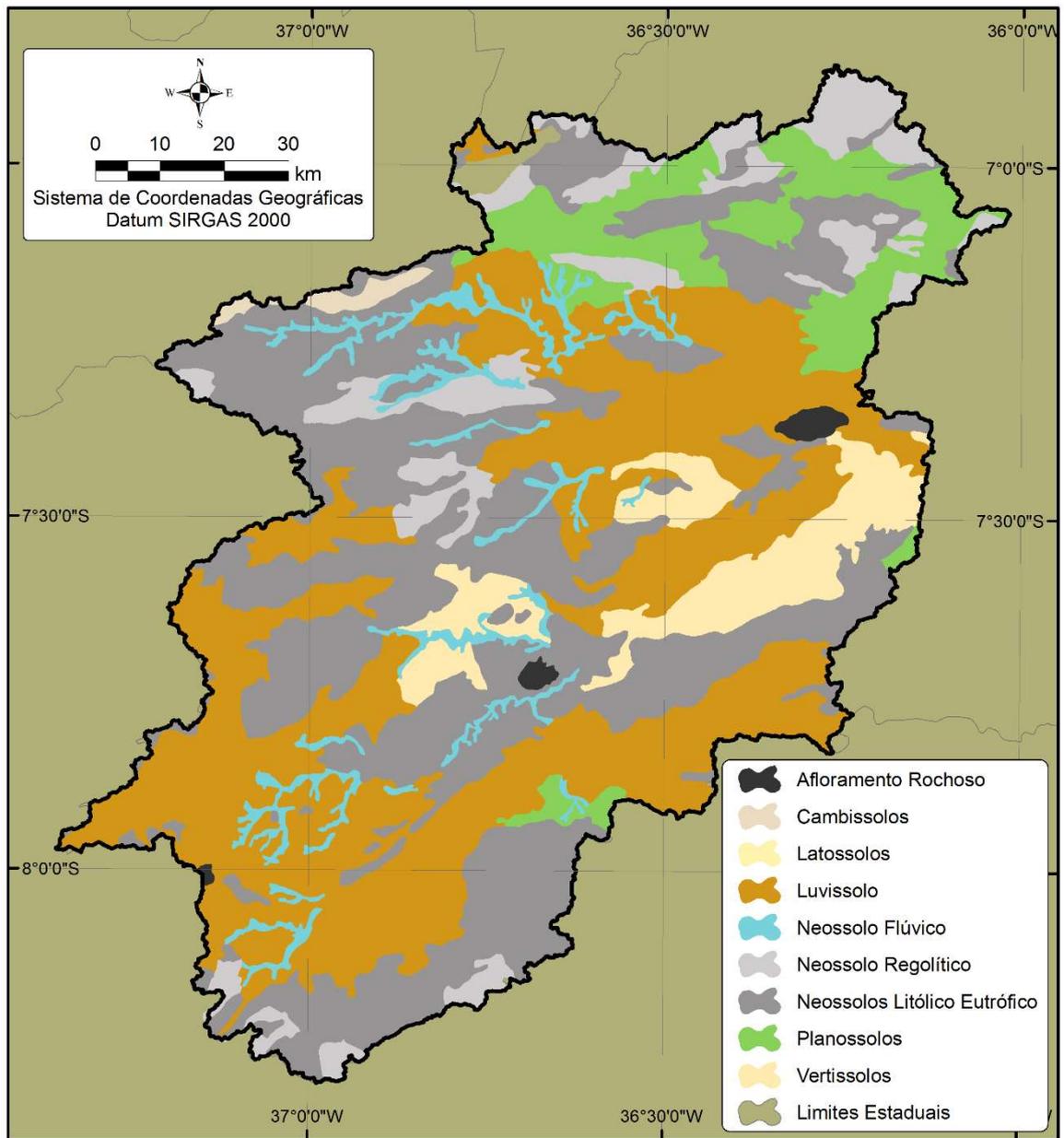


Figura 16 – Tipos de solos existentes na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

Tabela 4 - Informações básicas dos solos presentes na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

Solo	Área		Descrição
	km ²	%	
Afloramento Rochoso	68,17	0,56	Afloramento rochoso
Cambissolo	70,4	0,57	Solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos para serem enquadrados nas classes dos Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos e Organossolos. Têm sequência de horizontes A ou hístico, Bi, C, com ou sem R.
Latossolo	0,4	0,00	Solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte superficial, exceto hístico.
Luvissolo	4.434,22	35,90	Compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação de bases elevada, imediatamente abaixo do horizonte A ou horizonte E.
Neossolo Flúvico	526,18	4,26	Solo originário de sedimento aluvial de caráter flúvico.
Neossolo Regolítico	953,54	7,72	Solo com horizonte A sobrejacente ao horizonte C, podendo haver horizonte Bi com espessura menor que 10 cm.
Neossolo Litólico Eutrófico	4.440,39	35,95	Compreendem solos rasos e de alta fertilidade, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos.
Planossolo	1.009,12	8,17	Solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B ou com transição abrupta conjugada com acentuada diferença de textura do A para o horizonte B, imediatamente subjacente, adensado, geralmente de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta.
Vertissolo	847,32	6,86	Solos minerais argilosos que possuem horizonte vértico e pequena variação textural ao longo do perfil, nunca suficiente para caracterizar um horizonte B textural.
Total	12.351,58	100,0	

Fonte: Jacomine (2009).

Em seguida foi gerada a declividade para a bacia a partir dos dados do MDE. Para esta etapa foi utilizada a classificação de declividade do terreno proposta pela EMBRAPA

(1979). De acordo com essa classificação, foram definidas cinco classes de declividade para a bacia (Figura 17).

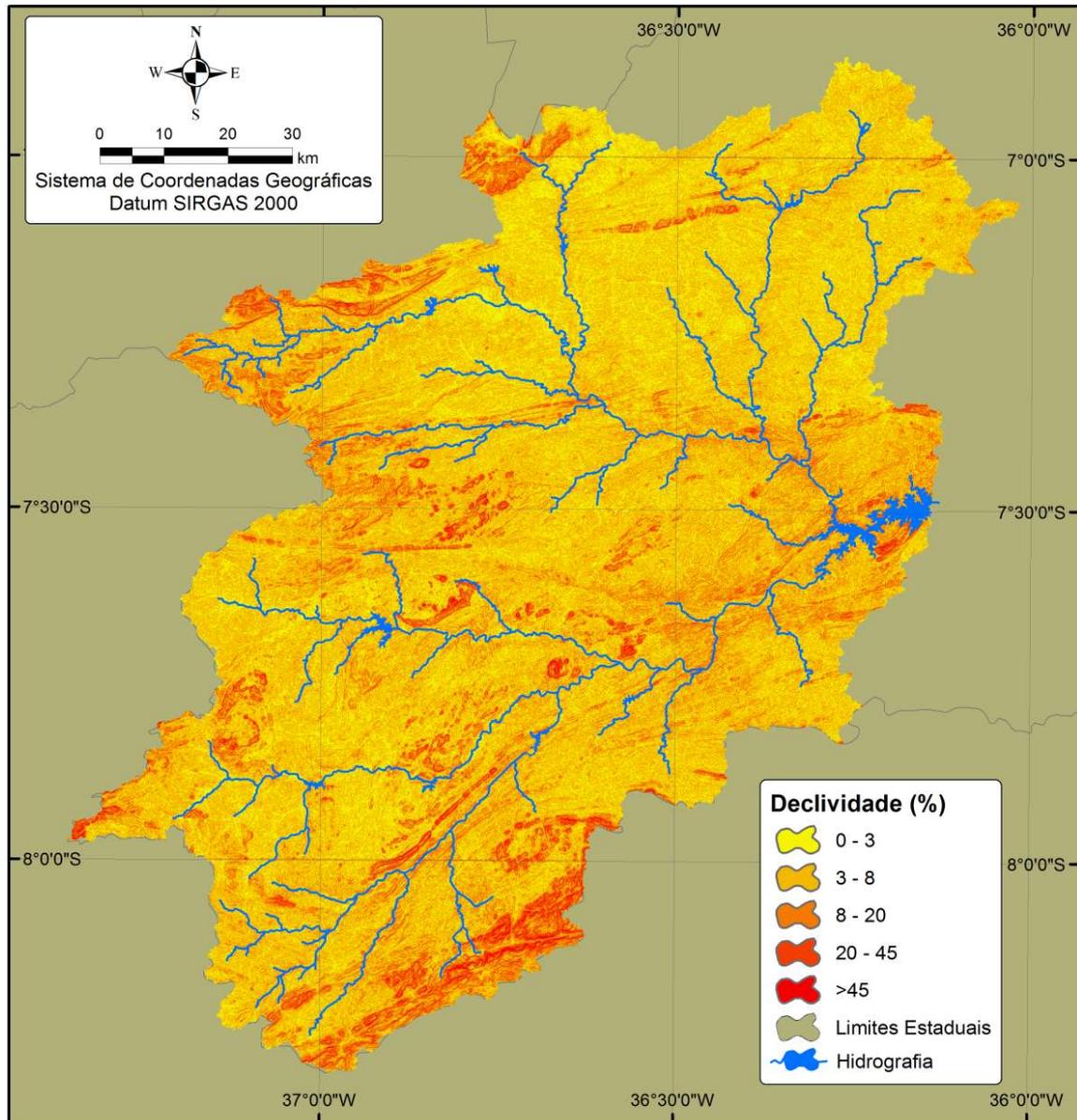


Figura 17 – Rede de drenagem e classes de declividade para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

Posteriormente, foram fornecidas ao modelo SWAT as seguintes informações climáticas em escala mensal: (a) temperatura máxima mensal, (b) temperatura mínima mensal, (c) desvio padrão mensal da temperatura máxima, (d) desvio padrão mensal da temperatura mínima, (e) precipitação média mensal, (f) desvio padrão da precipitação média mensal, (g) coeficiente de inclinação, (h) probabilidade de um dia com chuva após um dia

seco, (i) probabilidade de um dia com chuva depois de um dia com chuva, (j) número médio de dias de chuva no mês, (k) precipitação máxima de 30 minutos registrada no mês, (l) radiação solar média diária, (m) temperatura média diária do ponto de orvalho para cada mês, (n) velocidade média diária do vento.

Essas informações foram obtidas em quatro estações meteorológicas convencionais (Tabela 5), do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal>. Dentre as estações selecionadas, uma delas está totalmente inserida na bacia e as outras três localizadas no entorno dela.

Tabela 5 - Postos climatológicos utilizados neste estudo.

Id	Código	Nome	Longitude	Latitude	Altitude (m)
C1	82890	Arcoverde	-37,05	-8,43	680
C2	82792	Monteiro	-37,06	-7,88	603
C3	82791	Patos	-37,26	-7,01	249
C4	82795	Campina Grande	-35,88	-7,21	547

Fonte: INMET (2016).

5.3. Calibração automática do modelo SWAT com o SWAT-CUP

O modelo hidrológico SWAT possui uma grande quantidade de processos e, conseqüentemente, uma grande quantidade de parâmetros que influenciam nas respostas do modelo (SANTOS, 2015). Assim, é necessária uma automação do processo de calibração dos parâmetros físicos das propriedades hidrodinâmicas do solo do modelo e do mundo real, para que seja obtido um melhor ajuste entre eles.

Nesse sentido, para a calibração automática do modelo SWAT utilizou-se o *software* de domínio público chamado SWAT-CUP – *SWAT Calibration and Uncertainty Programs*, desenvolvido por Abbaspour et al. (2007). Esse *software* permite obter automaticamente os valores dos parâmetros do SWAT, levando-se em consideração a aproximação entre os volumes observados e estimados de vazão. O SWAT-CUP analisa também a sensibilidade dos parâmetros na etapa de calibração utilizando um algoritmo de análise.

Neste estudo foi utilizado o *Sequential Uncertainty Fitting* versão 2 – SUFI-2, que tem sido um dos mais utilizados para a calibração automática do modelo SWAT. Uma descrição mais detalhada desse algoritmo pode ser consultada em Abbaspour (2015). Para a

utilização do SUFI2, são necessárias algumas definições básicas, como: (a) escolha dos parâmetros que serão otimizados; (b) o estabelecimento de faixas mínimas e máximas fisicamente significativas para os parâmetros selecionados, assim como a relação matemática que deve ser adotada para a variação dos valores dos parâmetros; (c) o número de iterações que devem ser realizadas; (d) as variáveis a serem verificadas (vazão observada, por exemplo), incluindo a série histórica a ser considerada; (e) a função objetivo a ser utilizada como referência (SANTOS, 2015).

Após a modelagem inicial da bacia do reservatório Epitácio Pessoa foi realizada a calibração de forma automática dos parâmetros do modelo para uma melhor representação da área de estudo utilizando o SWAT-CUP. Foram então escolhidos 19 parâmetros para serem otimizados. Essa definição foi realizada a partir dos trabalhos de Dantas (2016), Medeiros e Silva (2014) e Santos (2015). Os parâmetros utilizados na calibração automática da modelagem na bacia são apresentados na Tabela 6. A calibração automática foi realizada para duas estações fluviométricas inseridas na área de estudo, a estação 38830000 – Caraúbas, localizada no rio Paraíba, sub-bacia 74 da modelagem e a estação 38850000 – Poço de Pedras, localizada no rio Taperoá, sub-bacia 62.

Tabela 6 - Descrição dos parâmetros calibrados automaticamente pelo SWAT-CUP.

Parâmetro	Descrição
Alpha_Bf	Fator de recessão de escoamento de base
Biomix	Eficiência da mistura biológica do solo
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação
Cn2	Valor da curva número para a condição de solo úmido
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal
Ch_N2	Coefficiente de Manning do canal
Epc0	Coefficiente de compensação da absorção de água pelas plantas
Esco	Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo
Gw_delay	Tempo de recarga do aquífero
Gw_revap	Coefficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada
Gw_qmn	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno
Rchrg_Dp	Fração de água percolada para o aquífero profundo
Revapmn	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar na zona saturada
Slsbbsn	Comprimento da declividade média
Sol_Al0	Albedo do solo
Sol_Awc	Capacidade de armazenamento de água no solo
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo
Sol_Z	Profundidade da camada de solo
Surlag	Tempo de retardo de escoamento superficial

5.4. Análise estatística de desempenho do modelo SWAT

Para a comparação entre as vazões observadas e as simuladas foram utilizados três métodos estatísticos: o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe – NS (NASH e SUTCLIFFE, 1970), o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2) e o Coeficiente de Tendência Percentual – PBIAS. Esses métodos já são utilizados em diversos estudos (ABBASPOUR et al., 2015; GOLMOHAMMADI et al., 2017; MORIASI et al., 2007; PEREIRA et al., 2016).

O Nash analisa o comportamento dos dados simulados em relação aos dados observados, podendo variar de $-\infty$ (infinito negativo) a 1, no qual Nash = 1 indica um ajuste perfeito. Esse coeficiente é calculado pela Equação 42.

$$Nash = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2} \right) \quad (42)$$

sendo E_m o evento observado; E_s o evento simulado pelo modelo; \bar{E}_s a média do evento observado no período de simulação; e n o número de eventos.

O R^2 calcula a associação linear entre duas variáveis, também variando de $-\infty$ (infinito negativo) a 1 (associação perfeita), sendo obtido pela Equação 43.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (43)$$

no qual x_i os valores observados; x_m a média dos valores observados; y_i os valores calculados pelo modelo; y_m a média dos valores calculado pelo modelo; e n o número de eventos.

O PBIAS representa a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores que os valores observados. Quanto menor o valor de PBIAS, melhor é o ajuste, com zero representando uma simulação perfeita dos eventos observados. Valores de PBIAS

positivos indicam a tendência de subestimação dos dados simulados, enquanto que valores negativos indicam superestimação (GUPTA et al., 1999; SANTOS, 2015; UZEIKA, 2009).

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^e (Y_{obs} - Y_{sim}) \cdot (100)}{\sum_{i=1}^e (Y_{obs})} \right) \quad (44)$$

5.5. Simulação do volume futuro do reservatório Epitácio Pessoa

Para realizar a estimativa de volume futuro para o reservatório Epitácio Pessoa entre 2020 e 2030, além dos procedimentos descritos anteriormente, também foram utilizados cenários futuros de precipitação. Essa metodologia tem como propósito auxiliar na tomada de decisão no gerenciamento do volume de água desse reservatório. Assim, optou-se por utilizar três cenários de precipitação (redução), baseado nos resultados das tendências de Mann-Kendall e Sen para a chuva do período de 1981 a 1991. Nesse sentido, foram gerados três cenários de precipitação: (a) redução de 40% do volume, (b) redução de 45% do volume, e (c) redução de 50% do volume.

Após a geração dos cenários de precipitação, foram realizadas simulações no SWAT para cada cenário de precipitação, gerando assim a vazão mensal para cada um dos cenários de precipitação a partir do cenário de uso do solo futuro. Posteriormente, foram analisados os resultados das projeções populacionais, gerando a projeção de demanda para o abastecimento humano, levando em consideração os valores de consumo per capita adotados pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA) e apontados no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (AESAs, 2006).

Outro fator utilizado para simular o volume futuro do reservatório é a evaporação, tendo em vista que essa é uma das variáveis que mais “consome” os recursos do reservatório. Para esta pesquisa foram adotados os valores de evaporação obtidos no estudo de Oliveira et al. (2005), que analisaram o uso do coeficiente do tanque classe A nas estimativas de evaporação para o reservatório Epitácio Pessoa.

Para determinar o volume inicial da projeção, tomou-se como base o volume armazenado no dia 22 de fevereiro de 2019, que era de 94.288.578,96 m³, ou 22,90% da capacidade total de armazenamento do reservatório. Essa informação foi obtida na AESA, no endereço eletrônico <http://www.aesa.pb.gov.br>. Foi então acrescentada a entrada

referente a vazão calculada pelo SWAT e retirado o volume previsto para o abastecimento público e a evaporação em cada mês, resultando no volume armazenado no reservatório, como apresentado na Equação 45:

$$V_{mês} = (V_{mês-1} + ENT_{mês}) - (ABAST_{mês} + EVAP_{mês}) \quad (45)$$

sendo $V_{mês}$ o volume a ser calculado, $V_{mês-1}$ o valor da quantidade de água armazenada no mês anterior, $ENT_{mês}$ o valor da vazão de entrada no reservatório do mês atual, $ABAST_{mês}$ os valores retirados para o abastecimento público no mês atual, e $EVAP_{mês}$ os valores da evaporação do reservatório no mês atual.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. PROJEÇÕES POPULACIONAIS PARA OS ANOS DE 2020 A 2030

Para analisar as projeções populacionais para os anos de 2020 a 2030, são necessários dados históricos de população da área de estudo. Neste estudo foram utilizadas informações dos Censos Demográficos dos municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa dos anos de 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010. Porém, os municípios de Barra de Santana, Caturité e Matinhas só dispõem de dados a partir do ano de 2000, devido ao fato da emancipação desses municípios ter ocorrido no ano de 1994, sendo inserido apenas no Censo de 2000. Os resultados históricos da evolução da população dos municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa podem ser conferidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Total de habitantes por município inserido na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

Municípios	População	1970	1980	1991	2000	2010
Alagoa Nova	Total de hab.	21.942	21.192	22.337	18.575	19.681
	Incremento	-	-3,42%	5,40%	-16,84%	5,95%
Barra de Santana	Total de hab.	-	-	-	8.311	8.206
	Incremento	-	-	-	-	-1,26%
Campina Grande	Total de hab.	195.303	247.827	326.307	355.331	385.213
	Incremento	-	26,89%	31,67%	8,89%	8,41%
Caturité	Total de hab.	-	-	-	4.183	4.543
	Incremento	-	-	-	-	0,83%
Lagoa Seca	Total de hab.	18.332	18.915	21.660	24.154	25.900
	Incremento	-	3,18%	14,51%	11,51%	7,23%
Matinhas	Total de hab.	-	-	-	4.086	4.321
	Incremento	-	-	-	-	5,75%
Pocinhos	Total de hab.	14.332	15.039	14.502	14.880	17.032
	Incremento	-	4,93%	-3,57%	2,61%	14,46%
Queimadas	Total de hab.	21.258	25.481	32.555	36.032	41.049
	Incremento	-	19,87%	27,76%	10,68%	13,92%
São Sebastião de L. de Roça	Total de hab.	6.652	7.267	8.794	10.026	11.041
	Incremento	-	9,25%	21,01%	14,01%	10,12%

Fonte: Censos Demográficos do IBGE.

Posteriormente os dados foram inseridos em uma planilha eletrônica e então foram realizadas as estimativas populacionais para todos os municípios. As projeções foram

realizadas utilizando 2 métodos: a) aritmético e b) geométrico, tendo como alvo o ano de 2030. A

Tabela 8 apresenta os resultados da projeção Aritmética, a

Tabela 9 a projeção Geométrica e a Figura 18 apresenta um gráfico de dispersão para os métodos de projeção.

Tabela 8 - Resultados das projeções populacionais utilizando o método de projeção aritmética

	Ano	População Total (hab)	Taxa de crescimento (%a.a.)
Censos Demográficos	1970	277.819	
	1980	335.721	1,91%
	1991	426.155	2,19%
	2000	475.578	1,23%
	2010	516.986	0,84%
Projeção Aritmética	2015	537.690	0,79%
	2020	558.394	0,76%
	2025	579.098	0,73%
	2030	599.802	0,71%

Tabela 9 - Resultados das projeções populacionais utilizando o método de projeção geométrica.

	Ano	População Total (hab)	Taxa de crescimento (%a.a.)
Censos Demográficos	1970	277.819	
	1980	335.721	1,91%
	1991	426.155	2,19%
	2000	475.578	1,23%
	2010	516.986	0,84%
Projeção Geométrica	2015	532.155	0,58%

2020	547.769	0,58%
2025	563.841	0,58%
2030	580.384	0,58%

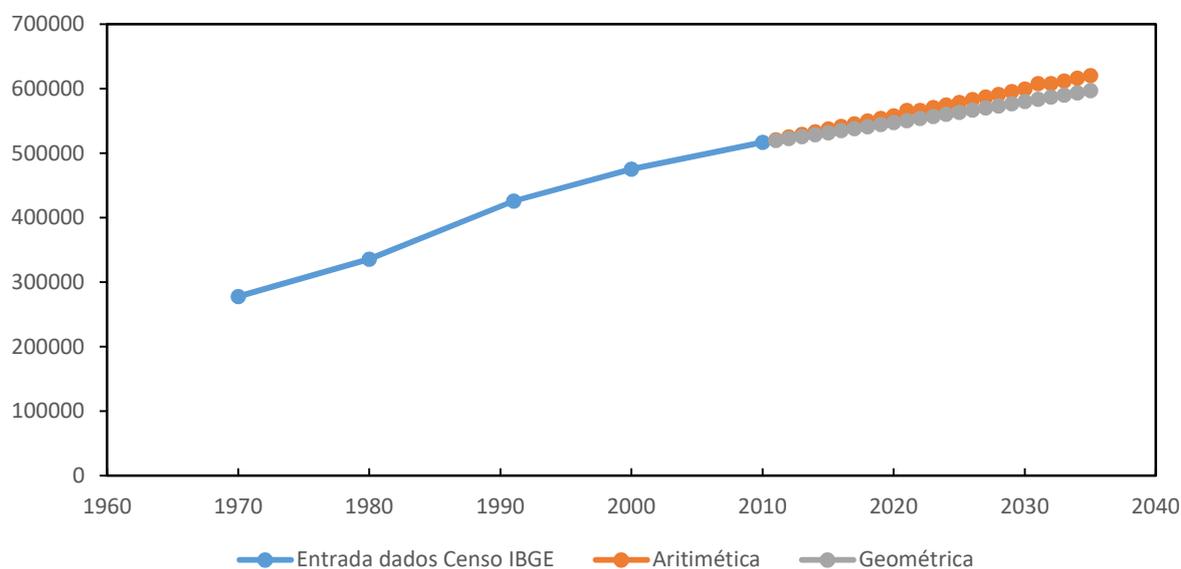


Figura 18 – Projeções populacionais com o total dos habitantes residentes nos municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa.

Dentre os tipos de projeção utilizados optou-se pelo uso da projeção aritmética, que apresentou melhores resultados quando comparados com os dados existentes nos Censos Demográficos.

2. CENÁRIOS FUTUROS DE USO DO SOLO

Para a geração do uso do solo para o ano de 2030 foram utilizados os mapas de uso e cobertura do solo do projeto MapBiomias dos anos de 2000, 2010 e 2015. Inicialmente, foi realizada uma reclassificação para homogeneizar as características entre os mapas utilizados e uma análise das áreas ocupadas por cada tipo de uso do solo, que se encontram na Tabela 10. Foram definidas cinco classes de cobertura do solo, conforme a Tabela 10. As Figura 19a–c mostram os mapas de uso do solo para da bacia do reservatório Epitácio Pessoa, para os anos de 2000, 2010 e 2015.

Tabela 10 - Área dos tipos de uso do solo na bacia.

Uso do solo	2000		2010		2015	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Caatinga	6.155,89	44,72	7.087,18	51,49	7.087,24	51,49
Agricultura/pastagem	7.609,34	55,28	6.678,05	48,51	6.678,00	48,51
Infraestrutura urbana	0,00017	0,00	0,00019	0,00	0,00020	0,00
Afloramento rochoso	0,00000	0,00	0,00000	0,00	0,00000	0,00
Corpos hídricos	0,00005	0,00	0,00014	0,00	0,00003	0,00
Total	13.765,24	100	13.765,24	100	13.765,24	100

Um ponto que deve ser levado em consideração para a elaboração do mapa futuro da região é o momento de aquisição das imagens utilizadas para criar o uso e cobertura do solo. O MapBiomas utiliza várias imagens ao longo do ano para poder gerar os mapas, e isso se faz necessário, por exemplo, para evitar a presença de nuvens nas imagens, o que torna quase impossível afirmar em que momento (dia e/ou mês) foi adquirida a imagem. Porém, sabe-se que o mapa é feito para cada ano, dessa forma pode-se buscar informações sobre as condições climáticas do ano em questão.

Sendo assim, é importante destacar que o ano de 2000 foi um ano com pouca precipitação, já no ano de 2010 a região passava por um período de boas precipitações, com o reservatório Epitácio Pessoa contando com um excelente volume armazenado. Situação bem diferente foi a verificada no ano de 2015, quando passava-se por um longo período de estiagem, fato que explica a semelhança entre os valores de 2000 e 2015.

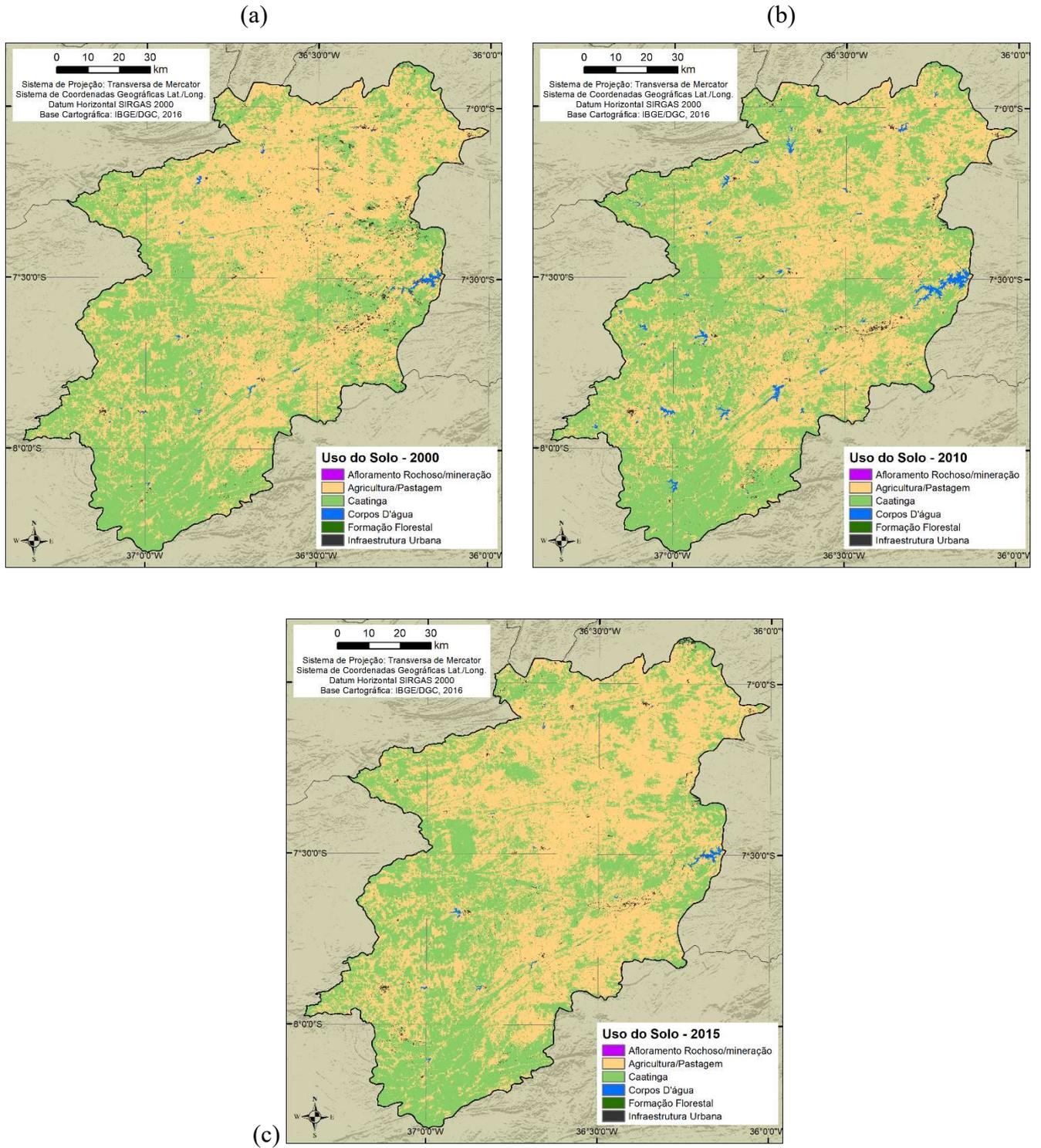


Figura 19 – Mapas de uso do solo para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa: (a) 2000, (b) 2010, e (c) 2015.

Em seguida foi realizada a comparação entre o mapa de uso do solo previsto pelo LCM e o mapa de uso do MapBiomias para o ano de 2015. A Tabela 11 mostra a área e o percentual de cada cobertura do solo e o erro entre as classes previstas e observadas. Os resultados mostram que valores obtidos podem ser considerados satisfatórios com os maiores erros variando de 8% a -10%. Com base nesses resultados, posteriormente foi elaborado o cenário de uso e ocupação do solo para o ano de 2030. A Figura 20 apresenta a distribuição espacial desses valores.

Tabela 11 - Resultado da comparação entre a cobertura do solo estimada e a observada para o ano de 2015.

Uso do solo	Predição 2015		Predição 2030		Erro (%)
	km ²	%	km ²	%	
Caatinga	5.548,85	44,74	7.188,27	57,98	8,86
Agricultura/pastagem	6.767,86	54,56	5.011,62	40,42	-10,39
Infraestrutura urbana	62,81	0,51	75,11	0,61	0
Afloramento rochoso/mineração	0,02	0,00	0,00	0,00	0
Corpos hídricos	24,28	0,20	122,62	0,99	0
Total	12.403,81	100	12.397,63	100	-

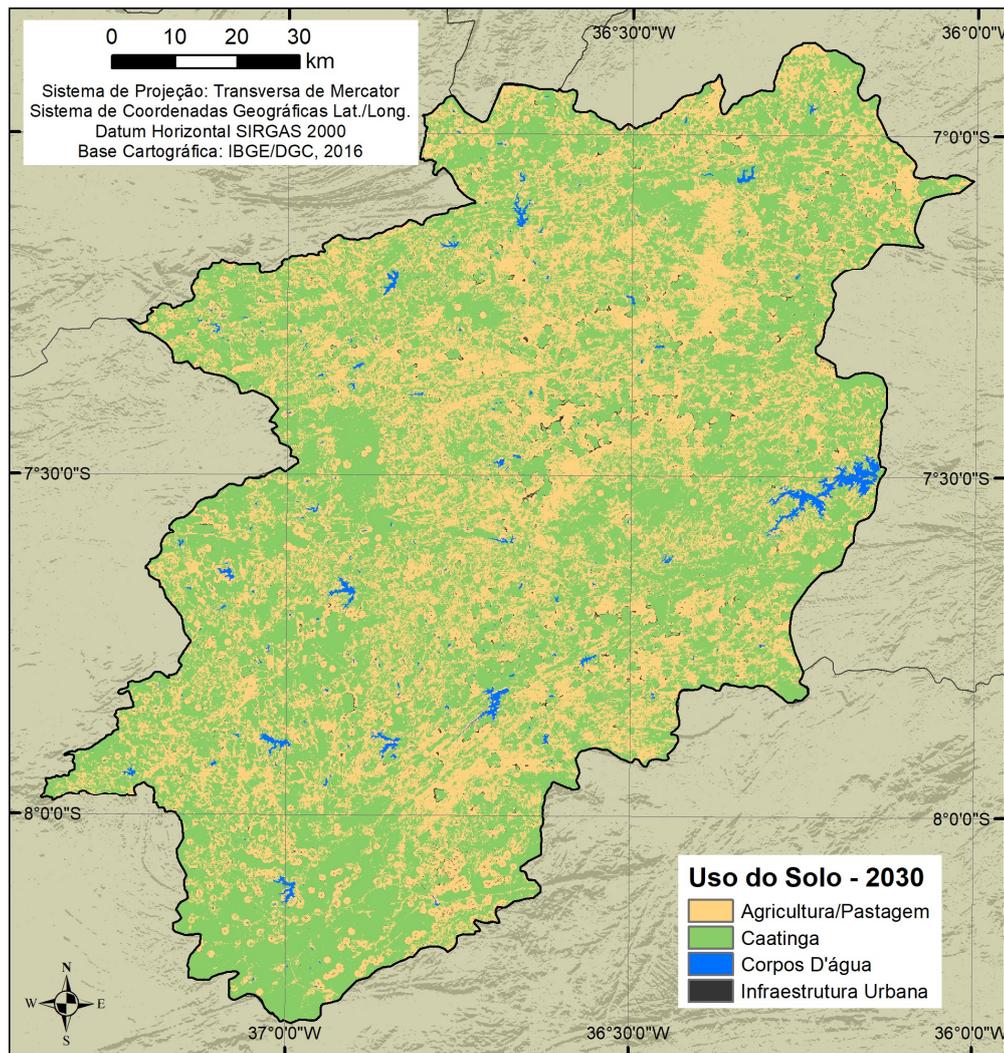


Figura 20 – Uso do solo na bacia do reservatório Epitácio Pessoa para o ano de 2030.

Os resultados da predição de 2030 apontam um aumento na área de Caatinga e diminuição na área de Agricultura/pastagem. Ocorreu aumento também nas classes de infraestrutura urbana e corpos hídricos. O aumento na infraestrutura urbana corrobora com os resultados das projeções populacionais, que apontam um aumento no número de habitantes. Com relação aos Corpos hídricos, seguiu o que foi apresentado no mapa de 2010, que foi um ano chuvoso.

3. ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL, TENDÊNCIAS E PROJEÇÕES DA PRECIPITAÇÃO

3.1. Análise espaço-temporal da precipitação

A espacialização dos dados de precipitação foi realizada a partir da interpolação dos dados utilizando o interpolador IDW, auxiliando na visualização da distribuição das chuvas na área de estudo. O IDW foi aplicado aos dados de precipitação média anual no período de 1963 a 1991 para cada posto pluviométrico da bacia, e o resultado dessa espacialização pode ser visto na Figura 21.

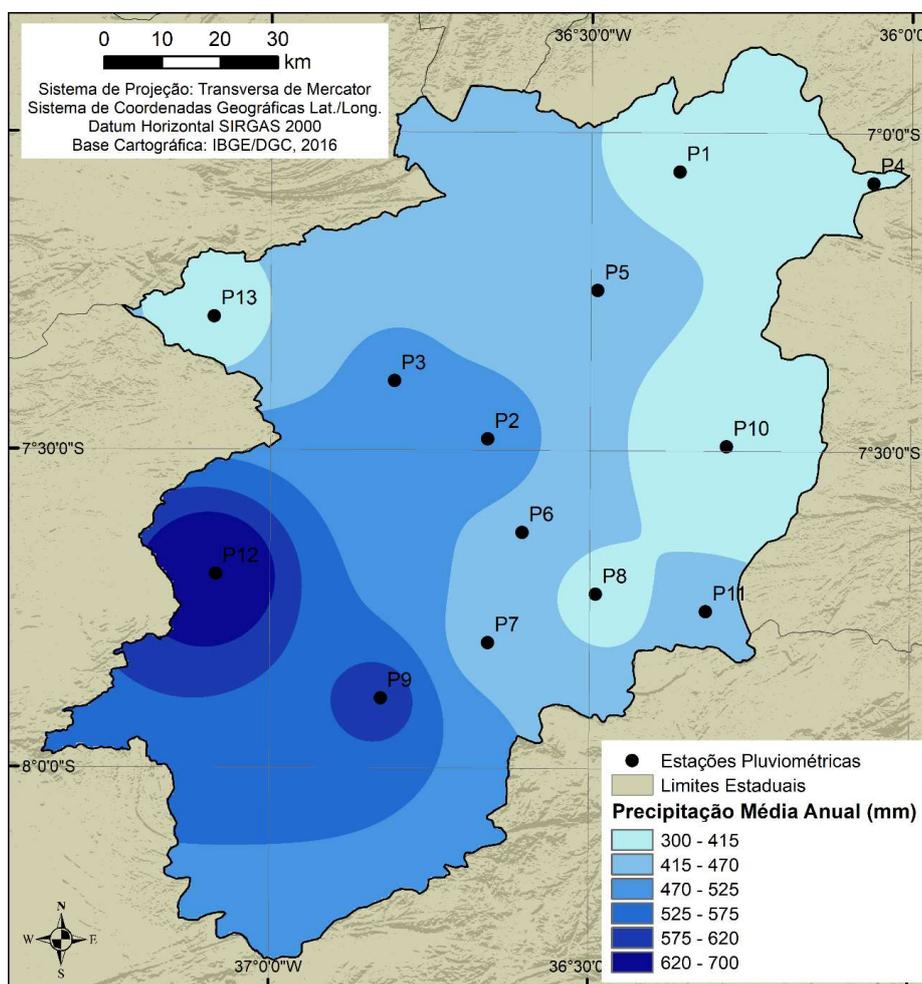


Figura 21 – Distribuição da precipitação média anual na bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

Os resultados da interpolação mostraram que a região sudoeste da bacia recebeu um maior volume de chuvas, com valores entre 525 e 700 mm/ano. A região nordeste da bacia concentra os menores valores de precipitação média anual, entre 300 e 415 mm/ano.

A Tabela 12 apresenta as precipitações mínimas, máximas, médias e o desvio padrão dos postos inseridos na bacia do reservatório Epitácio Pessoa. Destacam-se os postos P8 com a menor média pluviométrica, registrando uma precipitação mínima de 102,00 mm e máxima de 997,90 mm, e o posto P12 com a maior média pluviométrica, com uma precipitação mínima de 119,12 mm e máxima de 1433,80 mm.

Tabela 12 - Precipitações mínima, máxima, média e desvio padrão anuais dos postos pluviométricos da bacia do reservatório Epitácio Pessoa.

ID	Código ANA	Nome	Precipitação Mínima (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Precipitação Média (mm)	Desvio Padrão
P1	736008	Soledade	93,50	1035,00	395,40	185,93
P2	736009	Serra Branca	93,94	1172,20	495,08	257,48
P3	736011	São José dos Cordeiros	114,30	910,60	476,59	224,85
P4	736014	Pocinhos	132,90	1014,10	383,14	160,62
P5	736016	Gurjão	176,58	932,90	442,65	174,68
P6	736017	Coxixola	91,01	1312,80	470,04	257,94
P7	736018	Congo	353,91	538,22	446,07	55,86
P8	736020	Caraúbas	102,00	997,90	380,63	205,66
P9	736021	Camalaú	87,49	1458,70	602,56	279,24
P10	736022	Cabaceiras	20,99	775,50	307,66	193,29
P11	736025	Barra de São Miguel	165,70	782,50	431,96	181,46
P12	737004	Prata	119,12	1433,80	694,79	294,26
P13	737018	Desterro	21,00	1274,30	383,18	244,45

Os dados dos postos pluviométricos foram então aglutinados a fim de gerar a precipitação da área de estudo para auxiliar na escolha do período que servirá de base para as projeções de população. Dessa forma foi então criado um gráfico de anomalias da precipitação (Figura 22), que apresenta a variação da precipitação a partir da média. Com base na análise dessa figura decidiu-se utilizar o período entre os anos de 1981 e 1991 para realizar as projeções. Essa decisão se deu pelo período apresentar uma grande variação entre anos com precipitações abaixo da média, sendo cinco anos, e acima da média, também cinco anos, destacando também que o período apresenta um evento extremo de precipitação acima da média no ano de 1985.

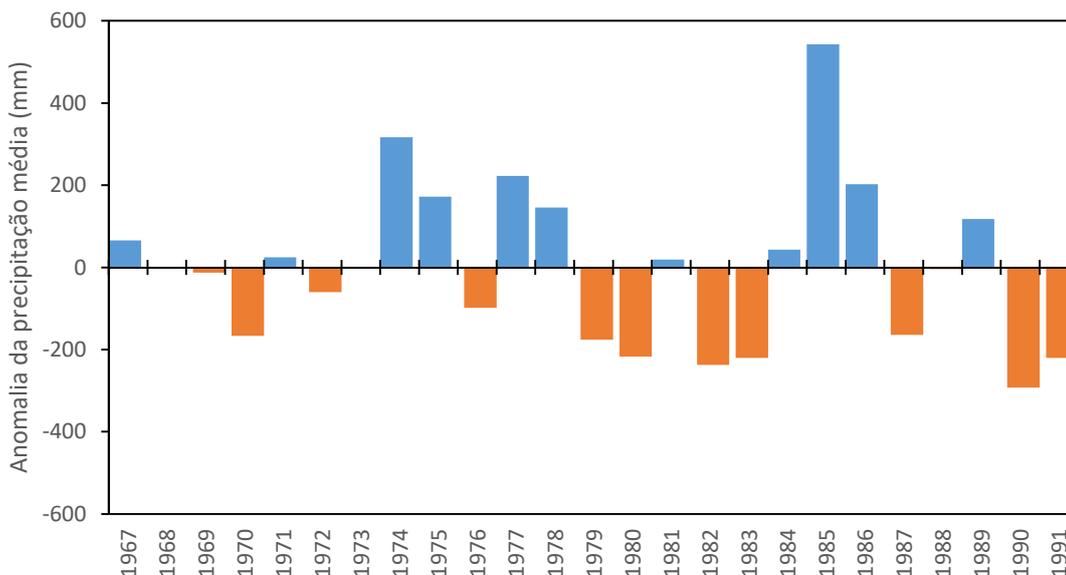


Figura 22 – Anomalia da precipitação média na bacia do reservatório Eptácio Pessoa.

No que tange a análise das tendências dos dados de precipitação, essa etapa tem como objetivo identificar a presença ou não de tendências positivas ou negativas nas séries de dados dos postos. Esse procedimento é essencial para identificar o comportamento hidrológico da bacia, bem como para simular e criar cenários futuros para a área de estudo.

Dessa forma foram utilizadas as séries históricas dos postos pluviométricos apresentados na Tabela 12. Para a aplicação dos testes paramétricos (precipitação mínima, máxima, média e desvio padrão) e não paramétricos (Mann-Kendall, Sen e Pettitt) utilizou-se a série de dados do período entre os anos de 1963 e 1991 por apresentar poucas falhas e uma homogeneidade dos dados.

3.2. Tendências da precipitação

Os resultados da aplicação dos testes de Mann-Kendall e Sen para os postos pluviométricos da área de estudo podem ser vistos na Tabela 13. Observa-se nessa tabela os valores obtidos de Z_s , que estima se há ou não a presença de tendência, p -value é o valor de confiança dos resultados da curvatura de Sen, e a aceitação ou rejeição da hipótese H_0 , de que não existe tendência na série de dados, bem como o risco de rejeição da hipótese.

Tabela 13 - Resultados dos testes de Mann-Kendall e Sen para os postos pluviométricos da área de estudo.

Id	Código da ANA	Nome	Z _s	p-value	D _s	Hipótese	
						H ₀	Risco
P1	736008	Soledade	0,319	0,750	1,320	Aceita	74,98%
P2	736009	Serra Branca	-0,694	0,488	-3,311	Aceita	48,77%
P3	736011	São José dos Cordeiros	-0,131	0,896	-0,383	Aceita	89,55%
P4	736014	Pocinhos	-0,619	0,536	-2,488	Aceita	53,59%
P5	736016	Gurjão	-0,356	0,722	-1,050	Aceita	72,15%
P6	736017	Coxixola	0,807	0,420	3,874	Aceita	41,99%
P7	736018	Congo	-0,431	0,666	-2,464	Aceita	66,62%
P8	736020	Caraúbas	0,244	0,807	1,199	Aceita	80,73%
P9	736021	Camalaú	-1,970	0,049	-11,300	Rejeitada	4,89%
P10	736022	Cabaceiras	-0,807	0,420	-2,234	Aceita	41,99%
P11	736025	Barra de São Miguel	-1,707	0,088	-7,208	Aceita	8,78%
P12	737004	Prata	-1,444	0,149	-9,808	Aceita	14,86%
P13	737018	Desterro	0,600	0,536	2,859	Aceita	53,59%

D_s = Declividade de Sen, Z_s = Indicador de tendência, H₀ = Não há tendência na série de dados, e Risco = Risco de rejeitar o resultado de H₀.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 13 percebe-se que dos 13 postos analisados, à partir de um valor de $\alpha = 0,05$, apenas o posto Camalaú apresentou rejeição à hipótese H₀, obtendo um percentual de risco muito baixo, com apenas 4,89%. A curvatura de Sen para esse posto foi a maior encontrada, com um valor de -11,3 mostrando assim uma tendência negativa nesse posto. Pode-se observar ainda na Tabela 13 que apesar de os outros 12 postos não terem alcançado o valor de α definido, os resultados da curvatura de Sen apontam que quatro postos possuem alguma tendência positiva (postos P1, P6, P8 e P13) e que oito apresentam tendência negativa (Postos P2, P3, P4, P5, P7, P10, P11 e P12), todos eles com valores de risco de rejeição muito altos. O valor de α utilizado nos testes proporciona uma confiança dos resultados.

O teste de Pettitt foi aplicado para as séries anuais de precipitação dos 13 postos localizados na bacia do reservatório Epitácio Pessoa, utilizando um valor de $\alpha = 0,05$. Os resultados apontam que a hipótese H₀, de que os dados são homogêneos, foi aceita nos 13 postos. Os resultados do teste de Pettitt podem ser visualizados na Tabela 14. Os resultados dos testes de Mann-Kendall, Sen e Pettitt foram utilizados para identificar possíveis

tendências e ajudar a identificar precipitação futura que será utilizada nos cenários para a área de estudo.

Tabela 14 - Resultados dos testes de Pettitt para os postos pluviométricos da área de estudo.

Id	Código ANA	K	t	p-value	Hipótese	
					H ₀	Risco
P1	736008	46,000	1970	0,262	Aceita	26,22%
P2	736009	90,000	1978	0,358	Aceita	35,82%
P3	736011	52,000	1978	0,461	Aceita	46,10%
P4	736014	58,000	1978	0,693	Aceita	69,32%
P5	736016	46,000	1989	0,257	Aceita	25,68%
P6	736017	54,000	1984	0,532	Aceita	53,22%
P7	736018	62,000	1978	0,835	Aceita	83,54%
P8	736020	50,000	1972	0,385	Aceita	38,48%
P9	736021	118,000	1978	0,070	Aceita	7,02%
P10	736022	72,000	1978	0,804	Aceita	80,44%
P11	736025	82,000	1968	0,526	Aceita	52,56%
P12	737004	92,000	1969	0,323	Aceita	32,30%
P13	737018	96,000	1970	0,263	Aceita	26,28%

K = ponto de mudança, t = indicação do ano onde houve ruptura na média, H₀ = os dados são homogêneos, e Risco = risco de rejeitar o resultado.

A Figura 23 apresenta os gráficos da distribuição temporal da precipitação, a linha de tendência do teste de Sen (linha vermelha) e a linha de ruptura do teste de Pettitt (linha preta), para cada um dos postos utilizados na pesquisa. A análise desses gráficos demonstra que a precipitação ocorre de forma irregular, com anos muito chuvosos e outros com pouca precipitação. Esse fato pode contribuir para a não configuração de tendências e/ou rupturas nas séries, tendo em vista a alta variação entre os períodos secos e chuvosos. Como apresentado na Figura 23, os resultados mostram que para a área de estudo não houve ruptura nas séries de precipitação.

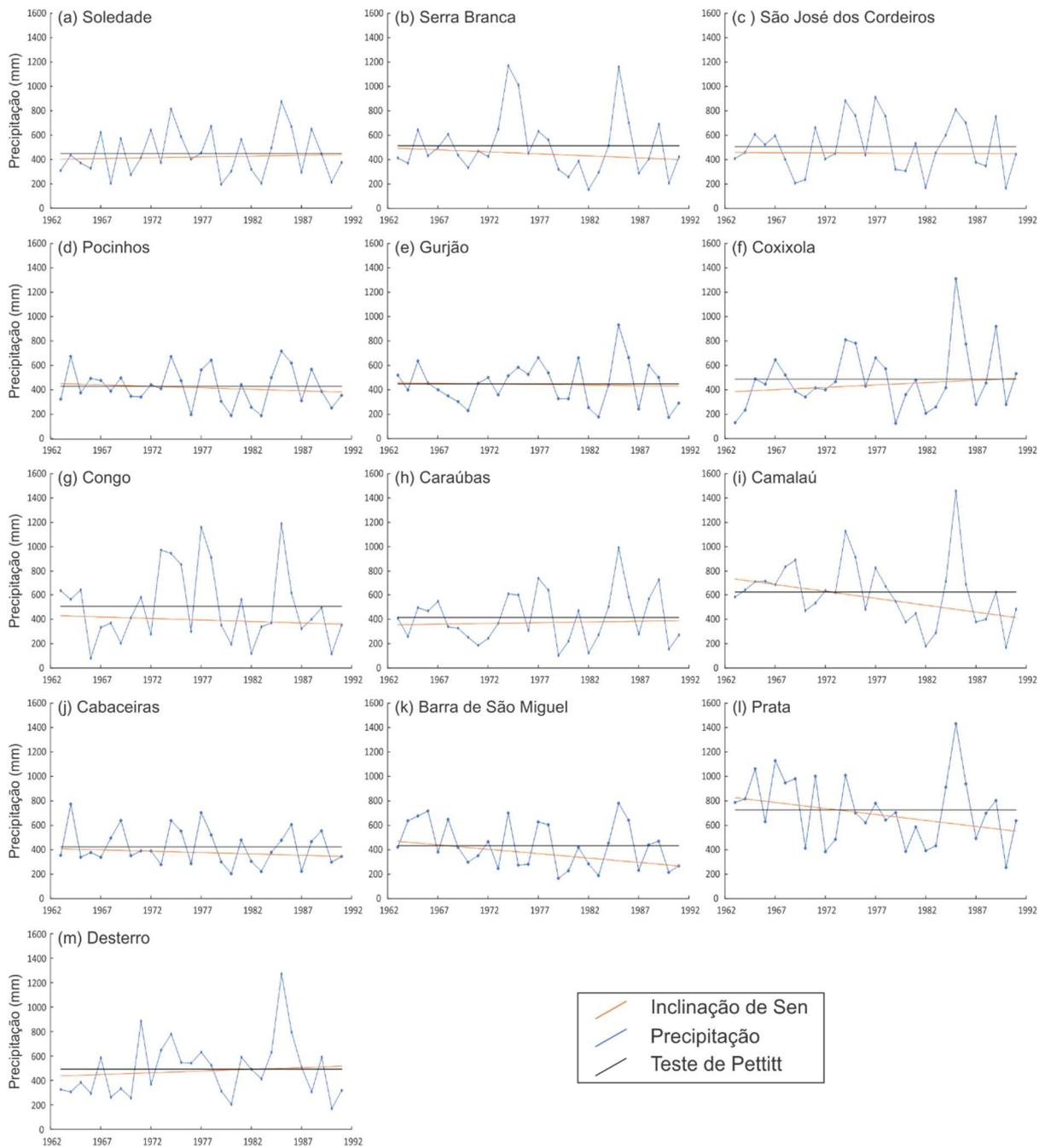


Figura 23 – Distribuição temporal da precipitação anual, declividade de Sen e teste de Pettitt.

3.3. Projeções futuras da precipitação para o período de 2020 a 2030

Para analisar as projeções futuras da precipitação para o período de 2020 a 2030, que darão suporte ao abastecimento de água no reservatório Epitácio Pessoa, foram geradas séries sintéticas de chuva, tomando como base os resultados dos testes de Mann-Kendall e Sen para os postos pluviométricos do período de 1981 a 1991 da área de estudo. Assim, com base nas tendências de chuva do referido período foram aplicados fatores de correção de chuva, e no presente estudo redução no volume precipitado em cada um dos postos.

Nesse sentido, foi aplicada redução da precipitação no período para cada posto pluviométrico, gerando assim a precipitação projetada, conforme os cenários pré-determinados com reduções de 40%, 45% e 50%. A Tabela 15 apresenta o valor médio, o desvio médio e o desvio padrão da precipitação observada no período entre 1981 e 1991 e os cenários projetados para o período de 2020 a 2030, e a Figura 24 mostra a espacialização temporal das precipitações projetadas para a bacia.

Tabela 15 - Média, desvio médio e desvio padrão das precipitações observada e projetadas.

Cenários de precipitação	Precipitação Média (mm)	Desvio Médio da Precipitação (mm)	Desvio Padrão da Precipitação (mm)
Observada (1981 a 1991)	39,21	40,37	63,15
Projetada com redução de 40%	23,53	24,21	37,96
Projetada com redução de 45%	21,57	22,19	34,79
Projetada com redução de 50%	19,61	20,18	31,63

Pode-se observar na Tabela 15 e na Figura 24 que, assim como na precipitação observada no período entre 1981 e 1991, as precipitações projetadas também apresentam baixos valores e que mesmo havendo uma redução nos volumes precipitados, o evento extremo apontado na Figura 22 ocorre em todas as projeções.

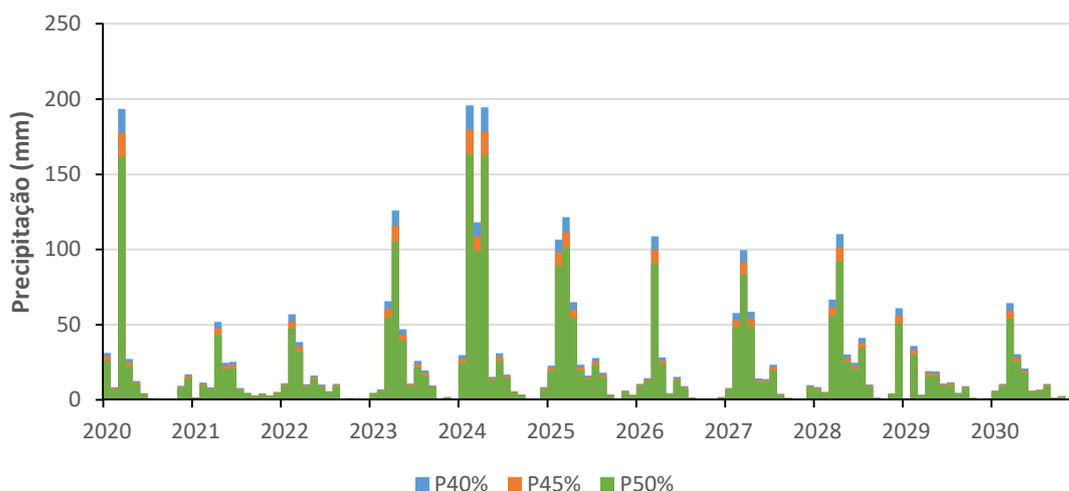


Figura 24 – Distribuição temporal das precipitações projetadas com redução de 40% (P40%), 45% (P45%), e 50% (P50%).

4. MODELAGEM HIDROLÓGICA

A etapa de modelagem da bacia do reservatório Eptácio Pessoa teve início após a preparação do banco de dados. Essa etapa foi baseada nos dados de precipitação dos postos apresentados na Tabela 2 para o período de 1963 a 1991, quando foram geradas 144 sub-bacias e 1411 URHs.

4.1. Calibração, validação e análise estatística de desempenho do modelo SWAT

Os resultados da calibração automática do SWAT-CUP podem ser conferidos nas Figura 25 e Figura 26, que demonstram as curvas da vazão observada e calculada para os períodos de calibração e validação dos postos Caraúbas e Poço de Pedras, respectivamente. As Tabela 16 e Tabela 17 mostram os resultados das análises estatísticas da calibração e validação dos dois postos.

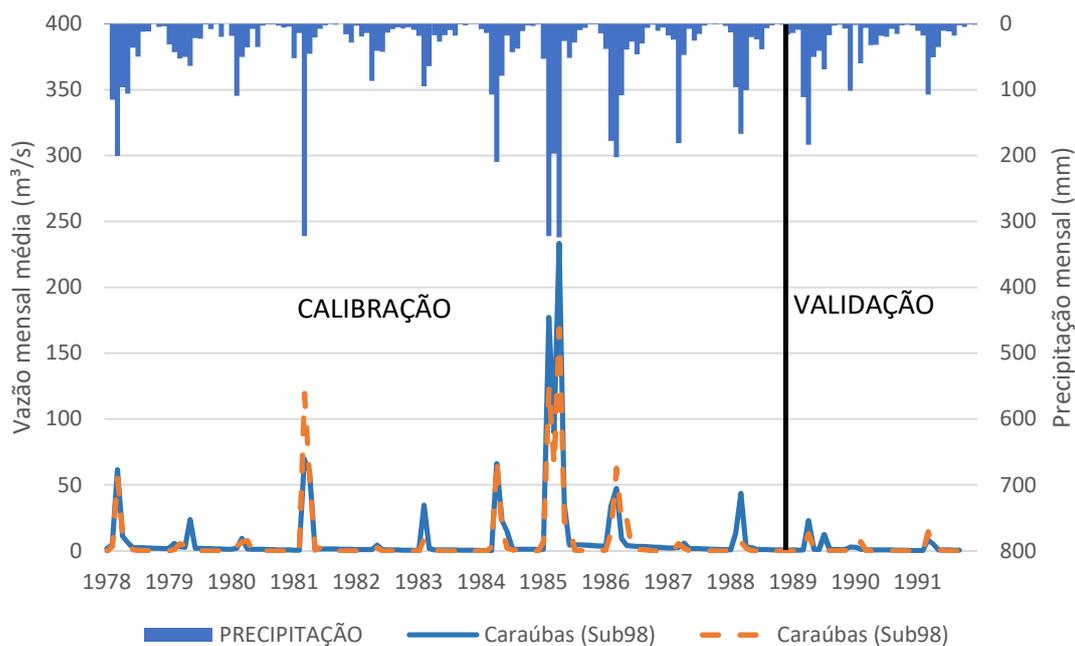


Figura 25 - Resultados da calibração e validação da vazão para o posto Caraúbas.

Pode-se observar na Figura 25 que o modelo conseguiu realizar uma simulação de vazão satisfatória em relação a vazão observada no período de calibração, atingindo bons resultados de R^2 e Nash (Tabela 16), apesar de apresentar uma subestimação, como pode ser observado na avaliação do PBIAS. Já no período de validação os resultados não foram tão bons, mesmo se comparadas a média observada e a simulada.

Tabela 16 - Análise estatística dos resultados da calibração e validação do modelo

Caraúbas (sub-bacia 74)			
Calibração		Validação	
1978–1988		1989–1991	
R^2	0,88	R^2	0,53
Nash	0,80	Nash	0,13
PBIAS	-32,04	PBIAS	-64,50
Vazão média simulada (m³/s)	9,47	Vazão média simulada (m³/s)	2,03
Vazão média observada (m³/s)	7,17	Vazão média observada (m³/s)	1,23

Os bons resultados de simulação se repetem quando analisamos os resultados para a estação Poço de Pedras (Figura 26 e Tabela 17), inclusive com subestimação da vazão. Porém, nesse caso os resultados do período de validação foram melhores do que no período

de calibração. Esse resultado pode ser explicado pela ausência de dados observados para realizar uma melhor comparação entre os valores observados e simulados.

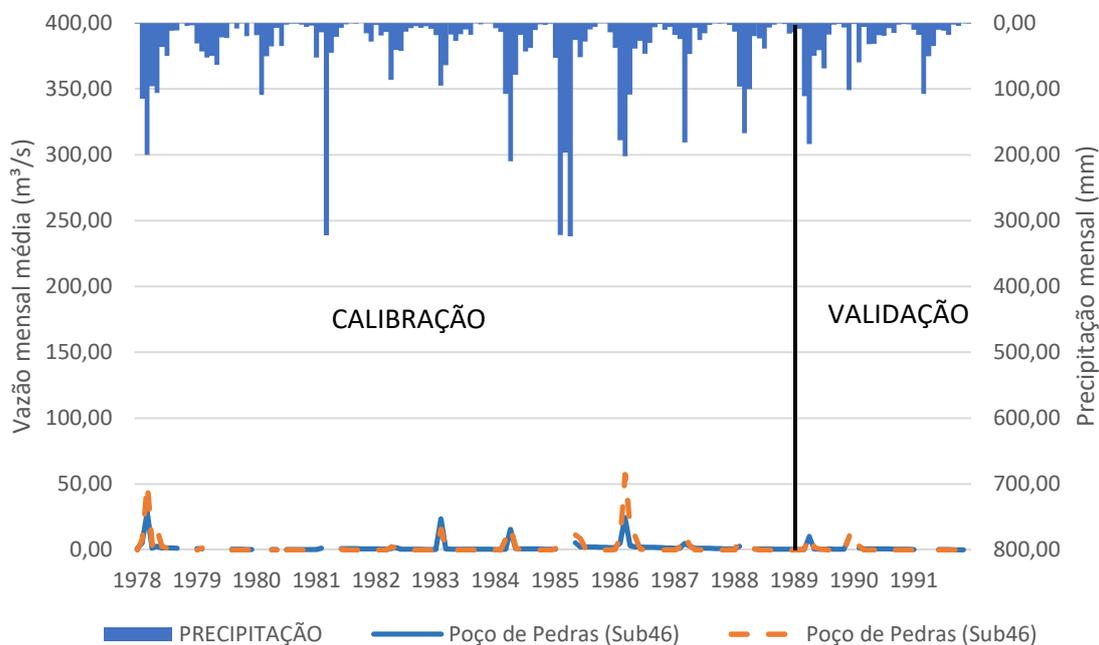


Figura 26 - Resultados da calibração e validação da vazão para o posto Poço de Pedras.

Tabela 17 - Análise estatística dos resultados da calibração e validação do modelo.

Poço de Pedras (sub-bacia 62)			
Calibração		Validação	
1978 - 1988		1989 - 1991	
R ²	0,79	R ²	0,97
Nash	0,67	Nash	0,95
PBIAS	21,27	PBIAS	-23,71
Vazão média simulada (m ³ /s)	1,92	Vazão média simulada (m ³ /s)	1,12
Vazão média observada (m ³ /s)	2,44	Vazão média observada (m ³ /s)	0,91

4.2. Modelagem da vazão projetada

Após a calibração e validação do modelo, foram realizadas simulações no SWAT para cada cenário de precipitação futura, gerando assim a vazão mensal simulada para os anos entre 2020 e 2030. Os valores médios estimados podem ser vistos na Tabela 18.

A Figura 27 mostra a distribuição temporal das vazões afluentes no reservatório Epitácio Pessoa projetadas com redução de 40, 45 e 50% da precipitação e que foram geradas

com o modelo SWAT. Pode-se observar nessa figura que há um pico de vazão em fevereiro de 2024, que é reflexo do evento extremo precipitado e apontado na Figura 24.

Tabela 18 - Vazão média mensal projetada afluente no reservatório Epitácio Pessoa.

Cenários de precipitação projetada	Vazão média (mm)	Desvio médio da vazão (mm)	Desvio Padrão da vazão (mm)
Redução de 40%	6,14	2,79	4,50
Redução de 45%	5,62	2,35	3,84
Redução de 50%	5,14	1,93	3,20

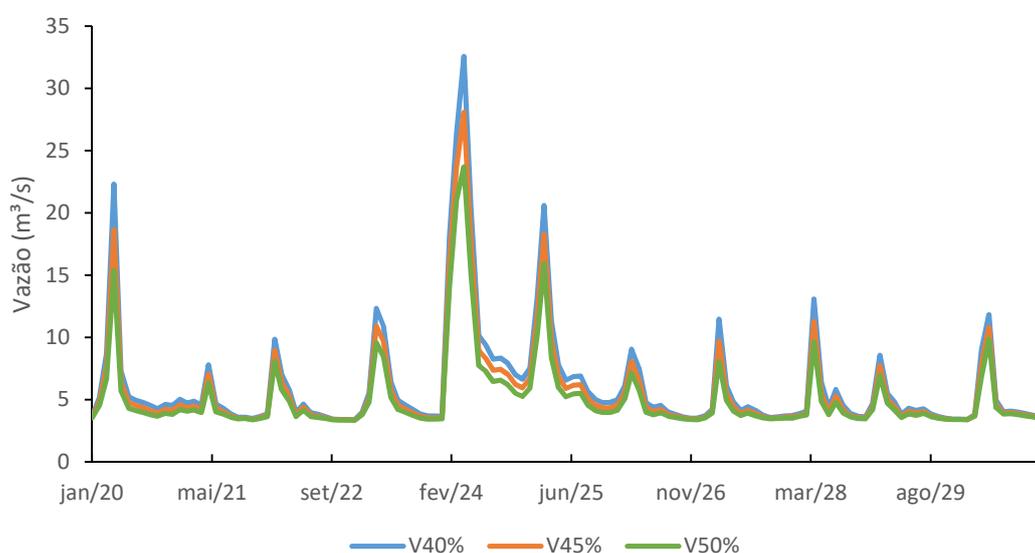


Figura 27 - Distribuição temporal das vazões afluente no reservatório Epitácio Pessoa que foram projetadas com redução de 40% (V40%), 45% (V45%), e 50% (V50%).

4.3. Análise do volume observado no reservatório Epitácio Pessoa

O reservatório Epitácio Pessoa desempenha um papel fundamental no abastecimento hídrico de diversos municípios paraibanos, dentre eles Campina Grande. Analisando o comportamento mensal do volume acumulado do reservatório Epitácio Pessoa referente ao período de 1967 e 2019 (AESAs, 2019), como mostrado na Figura 28. Observa-se que o reservatório possui uma alta variabilidade no volume armazenado, com períodos de cheia (2004 e 2006, 2008, 2009 e 2011) e outros de pouco volume (1999, 2003 e a partir de 2011). Nota-se que a partir de 2011 houve uma redução contínua no volume armazenado até o mês de fevereiro de 2017, chegando a atingir o nível mais baixo desde a sua construção,

retornando a recarregar o volume devido à chegada das águas do Projeto de Integração do Rio São Francisco, até maio de 2018, quando novamente volta a perder volume.

O PISF vem passando por alguns problemas que acabam prejudicando a sua funcionalidade, fazendo com que seja necessária a interrupção da vazão. Associado a esse fato, a alta evaporação também contribui para a redução do volume acumulado, como também não se tem garantia que todos os irrigantes deixaram de bombear água durante o período analisado. Ou seja, mesmo com a proibição pelos órgãos gestores, não se tem garantia da inexistência de irrigação clandestina no reservatório.

De acordo com dados históricos da região, a evaporação na bacia é aproximadamente de 2.000 mm/ano (DE MEDEIROS et al., 2018), o que acelera bastante a redução no volume. Além disso, existem ao longo das margens deste reservatório inúmeras propriedades agrícolas que retiram água do manancial, fato que colabora para uma redução rápida no volume armazenado.

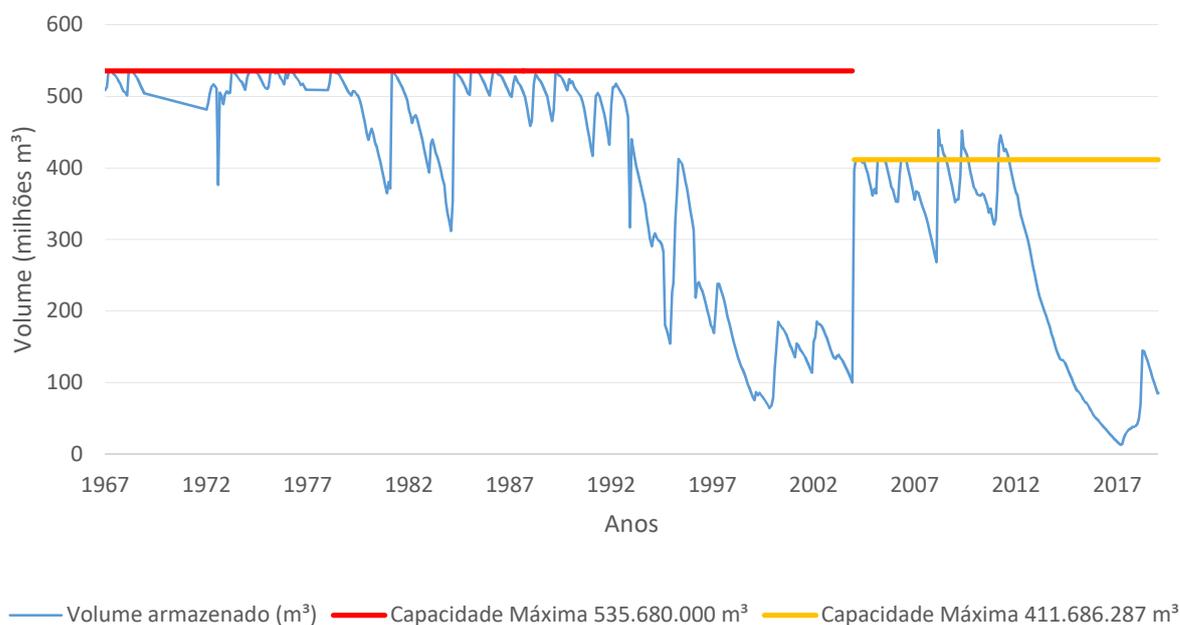


Figura 28 – Volumes mensais observados do reservatório Epitácio Pessoa.

Por localizar-se numa região de clima quente e seco, com o menor total pluviométrico do país, o reservatório é bastante vulnerável à variabilidade climática e aos impactos causados pelo homem, como, por exemplo, a construção de barramentos ao longo do curso principal 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).

4.4. Análise da transposição do Rio São Francisco para o reservatório Epitácio Pessoa

O projeto de Integração do Rio São Francisco com o reservatório Epitácio Pessoa se dá pelo Eixo Leste do projeto, tendo como ponto de início a captação de água no município de Floresta – PE. A concretização do eixo Leste aconteceu no dia 08 de março de 2017, quando as águas do São Francisco, após percorrerem 217 quilômetros de canais, foram despejadas no leito do Rio Paraíba e a partir daí percorreram aproximadamente 130 km, atingindo o reservatório Epitácio Pessoa no dia 18 de abril de 2017 (Correio da Paraíba, 2019).

Após a chegada das águas no reservatório, a transposição foi interrompida em vários momentos, desde obras inacabadas em alguns reservatórios ao longo do rio Paraíba, a rompimentos nos canais à montante do ponto de desague no rio.

O projeto inicial da transposição previa uma vazão máxima de 28 m³/s, trabalhando com uma vazão contínua de 10 m³/s, porém, de acordo com as informações do posto fluviométrico PISF Monteiro (AESAs, 2019)³, o volume médio despejado no leito do rio Paraíba foi de 3,63 m³/s no período entre 15 de maio de 2017 e 04 de fevereiro de 2019 (Figura 29). Esse valor foi convencionado neste estudo como vazão constante do PISF para o reservatório Epitácio Pessoa, sendo utilizado nas projeções de vazão futuras.

³ Disponível em <http://www.aesa.pb.gov.br>

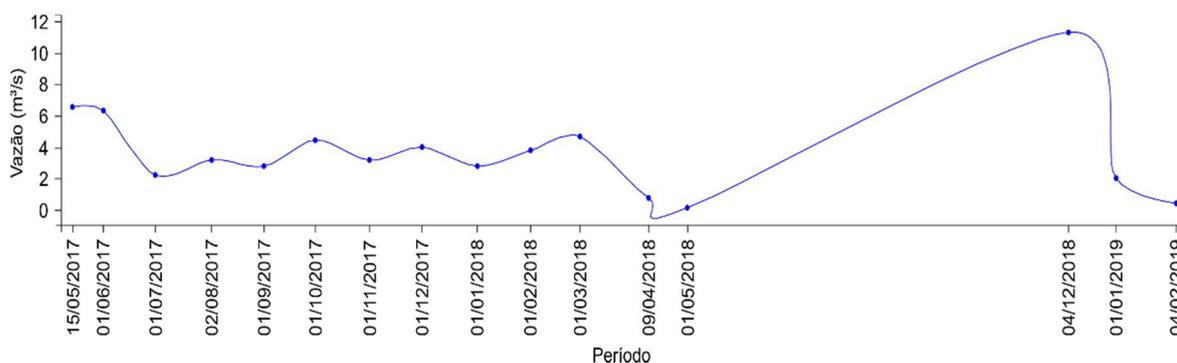


Figura 29 – Série de vazão do posto pluviométrico PISF Monteiro.
Fonte: AESA (2019).

4.5. Simulação futura do volume armazenado no reservatório Epitácio Pessoa

Para realizar a simulação futura do volume armazenado no reservatório Epitácio Pessoa foi criada uma planilha eletrônica que agrupou todas as informações coletadas e geradas por esta pesquisa. O procedimento inicial para essa etapa da pesquisa foi definir o volume que o reservatório terá no dia 01 de janeiro de 2020. Para tanto utilizou-se o valor de 94.288.578,96 m³, (22,90% da capacidade total). Esse valor refere-se ao volume armazenado no dia 22 de fevereiro de 2019 que foi fornecido pela AESA⁴.

Em seguida, acrescentou-se a vazão projetada em cada cenário obtido pelo SWAT, incluindo o incremento do PISF, onde foi assumido um valor constante de 3,63 m³/s, conforme apresentado na Figura 27.

Posteriormente foram analisados os resultados das projeções populacionais, gerando a projeção de demanda para o abastecimento humano, levando em consideração os valores de consumo per capita adotados pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA), apontados no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (AESA, 2006). A Tabela 19 mostra os valores de referência do plano. Neste estudo adotou-se um consumo de 250 litros por habitante por dia, tendo em vista que as projeções estabelecidas para o estudo apontam que a bacia deverá abastecer uma população superior a 500.000 habitantes.

⁴ Disponível no endereço eletrônico <http://www.aesa.pb.gov.br>

Tabela 19 - Valores de referência para o abastecimento humano adotados pela CAGEPA.

Número de habitantes	Consumo (Litros por habitante ao dia)
Até 100.000	100
de 10.000 até 100.000	120
de 100.000 até 300.000	150
de 300.000 até 500.000	200
acima de 500.000	250

A Tabela 20 apresenta os valores que serão necessários para o abastecimento dos municípios atendidos pelo reservatório. Esses valores representam o consumo mensal que deverá ser captado pela CAGEPA e leva em consideração a quantidade de habitantes e um percentual de perdas por falhas no sistema. Não diferencia o uso que a água terá, apenas a captação pela companhia responsável pelo abastecimento. Os valores são referentes ao que deve ser captado mensalmente em cada ano da projeção e estão expressos em metros cúbicos.

Tabela 20 - Consumo mensal projetado para o reservatório Epitácio Pessoa de 2020 a 2030

Ano	População Total	Volume (m³/mês)
2020	558.394,00	5.535.080,53
2021	566.675,60	5.601.824,42
2022	566.675,60	5.601.824,42
2023	570.816,40	5.642.757,95
2024	574.957,20	5.699.263,25
2025	579.098,00	5.724.625,02
2026	583.238,80	5.765.558,55
2027	587.379,60	5.806.492,09
2028	591.520,40	5.863.445,97
2029	595.661,20	5.888.359,15
2030	599.802,00	5.929.292,69

Outro fator utilizado para simular o volume futuro do reservatório é a evaporação, tendo em vista que essa é a principal variável que mais “consome” os recursos do reservatório. Para essa pesquisa foram utilizados os valores de evaporação adotados no estudo de Oliveira *et al.* (2005) que analisaram o uso do coeficiente do tanque classe A nas estimativas de evaporação para a cidade de Boqueirão, para o ano de 2003, onde está

localizado o reservatório Epitácio Pessoa. A Tabela 21 apresenta os valores de evaporação adotados no estudo.

Tabela 21 - Evaporação média do tanque Classe A, segundo Oliveira et al. (2005).

Meses	Evaporação Tanque Classe A (mm)
Janeiro	265
Fevereiro	195
Março	200
Abril	190
Maió	130
Junho	100
Julho	135
Agosto	180
Setembro	230
Outubro	250
Novembro	260
Dezembro	255

Pode-se observar que os meses com maiores valores de evaporação são os do período entre setembro e janeiro, com um média mensal de aproximadamente 250 mm. Outro ponto importante a se destacar é que no período chuvoso da bacia, que é de fevereiro a maio, os valores de evaporação ainda são muito altos, com até 200 mm ao mês.

Após a junção de todos fatores necessários, criou-se um gráfico com os volumes futuros que o reservatório poderá armazenar (Figura 30), de acordo com os procedimentos adotados nesta pesquisa.

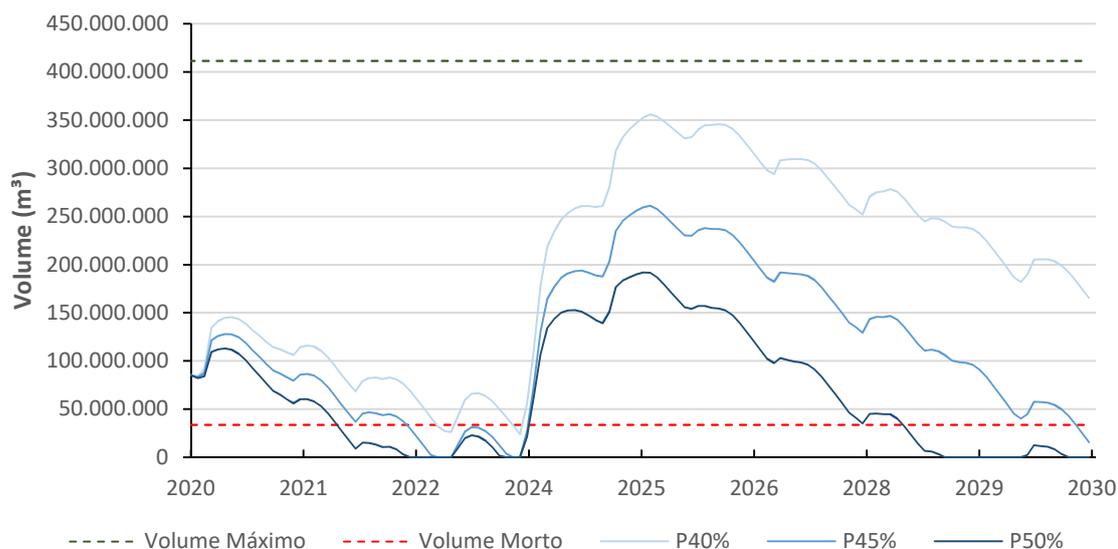


Figura 30 – Cenários de volume armazenado no reservatório Epitácio Pessoa no período entre 2020 e 2030.

Na Figura 30 foram plotados a capacidade máxima de armazenamento do reservatório, bem como o volume crítico, também chamado de volume morto, onde a qualidade da água fica comprometida pela concentração de sais. Os resultados plotados nessa figura demonstram que a partir de 2020 o reservatório conseguirá aumentar o seu volume, porém logo inicia o processo de esvaziamento, atingindo o volume morto entre 2021 e 2022 nos cenários mais pessimistas, onde as precipitações foram reduzidas em 45% e 50%, chegando inclusive a secar. No cenário menos pessimista (40% de redução da precipitação), o reservatório chega a atingir o volume morte em dois momentos, em 2022 e no final de 2023.

No ano de 2024 acontece então um evento extremo de precipitação, ocasionando um acréscimo considerável no volume do reservatório, atingindo o valor de 350 milhões de metros cúbicos no ano de 2025, quando retorna a esvaziar continuamente, devido à diminuição das precipitações.

Pode-se perceber, ao analisar o gráfico, que em nenhum momento o reservatório atinge sua capacidade máxima, mesmo com a vazão contínua do PISF, o que demonstra que os municípios abastecidos pelo reservatório não podem se considerar seguros com relação à disponibilidade hídrica, como prometido pelo projeto. Esse fato demonstra a necessidade de um melhor processo de gestão do recurso, com um controle mais eficaz das retiradas de

água, diminuição dos desperdícios, bem como uma mudança cultural da população para se evitar problemas futuros.

CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa conseguiu avaliar como e quanto a variabilidade climática, o aumento populacional e as alterações no uso e ocupação do solo afetam a disponibilidade hídrica do reservatório Epitácio Pessoa, buscando prever até quando o reservatório conseguirá atender a demanda da população.

Com relação às precipitações, as tendências detectadas não alcançaram os níveis de confiança com significância de 95%, mas demonstraram uma diminuição destas na maioria dos postos analisados, pois, em nove postos foram obtidas tendências negativas fato que serviu como indicação na predição de cenários climáticos futuros, que foram utilizados para a modelagem dos anos 2020 a 2030.

A modelagem hidrológica realizada para a bacia obteve resultados considerados satisfatórios no período de calibração, conforme indicado na literatura. No que tange aos cenários de precipitação gerados, pode-se concluir que os percentuais de diminuição utilizados na geração das vazões futuras somadas as vazões médias da transposição do São Francisco, representaram bem a variabilidade temporal obtida na série histórica, refletindo em períodos de aumento no volume. No entanto, apresenta também uma diminuição constante, levando a diminuição do volume, e, conseqüentemente, da disponibilidade de água no reservatório.

Pode-se concluir que o crescimento populacional previsto para o período de 2020 a 2030 resultou em um aumento significativo no número de habitantes, o que pode levar a um colapso na disponibilidade de água no reservatório em vários cenários de redução da precipitação, tendo em vista que o crescimento da população aumentará a demanda por água, mesmo com a vazão da transposição do rio São Francisco.

Os resultados desta pesquisa comprovam que a hipótese levantada, ou seja, de que mesmo com as águas da transposição, o reservatório entrará mais uma vez no estado crítico, ou seja, no volume morto, a partir do ano de 2022. Chegando a alcançar novamente o volume morto, e inclusive a secar totalmente, quando observam-se os cenários de redução de 45% e 50% da precipitação. Nesse sentido, deve-se destacar aqui que essa não é uma previsão exata, mas tem como objetivo alertar os tomadores de decisão sobre o comportamento estimado do

volume em diferentes cenários climáticos e de uso do solo na bacia hidrográfica do reservatório Epitácio Pessoa.

Essa constatação levanta a necessidade de uma melhor gestão dos recursos hídricos do reservatório, a fim de se evitar um colapso no sistema de abastecimento, atingindo diretamente as populações do município de Campina Grande e de todos os outros abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa.

Com base nos resultados obtidos podem ser feitas algumas recomendações, buscando um melhor aproveitamento dos recursos hídricos:

- Realizar um diagnóstico do nível de assoreamento do reservatório Epitácio Pessoa, tendo em vista que o reservatório passou por apenas três momentos de análise de sua capacidade de armazenamento, sendo a primeira no ano de 1998, a segunda em 2003 e a terceira em 2004, quando foi realizado o último levantamento batimétrico pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH através do Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto – LMRS, sendo necessário uma atualização da capacidade máxima de armazenamento;
- Instalação, manutenção e reativação de estações pluviométricas e fluviométricas e meteorológicas ao longo da bacia para melhor monitoramento dos processos hidrológicos;
- Identificar quantos são os reservatórios instalados ao longo da bacia e registrar as características técnicas para diagnosticar onde e quando se retêm as águas que poderiam chegar ao reservatório Epitácio Pessoa;
- Realizar um melhor controle dos usos da água e das formas de captação, tanto no reservatório quanto no rio Paraíba, agora perenizado pelo PISF;
- Incentivar práticas conservacionistas por parte dos agricultores da bacia do reservatório Epitácio Pessoa;
- Realizar campanhas de conscientização com os habitantes dos municípios atendidos pelo reservatório Epitácio Pessoa para melhor utilização da água, alertando sobre possíveis períodos de colapso.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs. [s.l.] Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2015.

ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 733–752, 2015.

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

AESA – Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba. Volume diário dos principais reservatórios. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br>. Acessado em: 05 de novembro de 2017.

AESA – Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba. Relatório final consolidado do PERH-PB. Disponível em: <http://www.paraiba.pb.gov.br/aesa>. Acessado em: 03 de dezembro de 2018.

ALMEIDA, B.M.; JOSÉ, H.V.; DUARTE, S.N.; FRIZZONE, J.A.; ARRAES, F.D.D.; PERBONI, A. Análise de tendência temporal da precipitação diária máxima no Estado de São Paulo. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 3, n. 1, p. 1–12, 2014.

AMORIM, J.A.F. Análise e modelação da mudança da ocupação e uso do solo: Caso de estudo da bacia hidrográfica do rio Vez. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do território), Instituto Politécnico de Viana do Castelo- Escola Superior Agrária, Ponte de Lima, 129 f., 2015.

ANA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba - AESA. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/>. Acesso em dezembro 2013.

ANAYA-ROMERO, M., MUÑOZ-ROJAS, M., IBÁÑEZ, B., MARAÑÓN, T. Evaluation of forest ecosystem services in Mediterranean areas: a regional case study in South Spain. *Ecosystem Services*, 20, 82–90, 2016.

ARAÚJO, J.A.A. Barragens do Nordeste do Brasil. Fortaleza: DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, 1990.

ARAÚJO, J.C. Recursos hídricos em regiões semiáridas. In: GHEYI, H.R.; PAZ, V.P.S.; MEDEIROS, S.S.; GALVÃO, C.O. Recursos hídricos em regiões semiáridas: Estudos e aplicações. 1ª ed. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido-INSA / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, p. 29–43, 2012.

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, 2012. 650p.

- BACK, Á.J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 5, p. 717–726, 2001.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global. Esboço metodológico. *RA’EGA - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 8, n. 8, p. 141–152, 2004.
- BEUCHLE, R.; GRECCHI, R.C.; SHIMABUKURO, Y.E.; SELIGER, R.; EVA, H.D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, v. 58, p. 116–127, 2015.
- BICHERON, P.; DEFOURNY, P.; BROCKMANN, C.; SCHOUTEN, L.; VANCUTSEM, C.; HUC, M.; BONTEMPS, S.; LEROY, M.; ACHARD, F.; HEROLD, M.; RANERA, F.; ARINO, O. Globcover – Products Description and Validation Report. *ESA Bulletin*, v. 136, p. 53, 2011.
- BIGOTTO, J.F.; VITIELLO, M.A.; ALBUQUERQUE, M.A.M.; *Geografia sociedade e cotidiano: Fundamentos do espaço geográfico*. 1. ed. São Paulo: Escala Educacional, 2006.
- BLAINSKI, E.; SILVEIRA, F.A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSA, L.H.P.; VIANNA, L.F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. *Agropecuária Catarinense*, v. 24, n. 1, p. 65–70, 2011.
- BLUMSTEIN, M., THOMPSON, J.R. Land-use impacts on the quantity and configuration of ecosystem service provisioning in Massachusetts, USA. *Journal of Applied Ecology*, 52 (4), 32–47, 2015.
- BRASIL. Projeto de Integração do Rio São Francisco com bacias hidrográficas do nordeste setentrional - Relatório de impacto ambiental - RIMA. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2004.
- BRASIL. Projeto Rio São Francisco – O andamento das obras. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco/o-andamento-das-obras>>. Acesso em: 17 set. 2018.
- BRASIL. Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente do Projeto de integração do rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - RIMA, Brasília, Junho 2004. MI - Ministério da Integração Nacional: 129 p, 2004.
- 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 (1). p. 53-64. 2016.
- BRITO, F B. O conflito pelo uso da água do Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) - PB. p. 208, Dissertação de Mestrado, 2008.

BRITO, F.B. Conflitos Pelo Acesso e Uso da Água: Integração do Rio São Francisco com a Paraíba (Eixo Leste). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 371p, 2013.

BRITO, L.P.G.; CAVENAGHI, S.; JANNUZZI, P.D.M. Estimativas e projeções populacionais para pequenos domínios: uma avaliação da precisão para municípios do Rio de Janeiro em 2000 e 2007. *Revista Brasileira de Estudos de População*, v. 27, n. 1, p. 35–57, 2010.

BUARQUE, D.C. Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos. p. 1-16, 2007.

CALOIERO, T.; COSCARELLI, R.; FERRARI, E.; SIRANGELO, B.; Trends in the Daily Precipitation Categories of Calabria (Southern Italy). *Procedia Engineering*, v. 162, p. 32–38, 2016.

CÂMARA, E. Os Alicerces de Campina Grande: Esboço histórico-social do povoado e da vila (1697 a 1864). Campina Grande, PB: Editora Caravela, 1999.

CAMPINA GRANDE. Livro do município de Campina Grande.pdf. João Pessoa: UNIGRAF - União Artes Gráficas Ltda, 1984.

CARUSO, C.; QUARTA, F. Interpolation methods comparison. *Computers & Mathematics with Applications*, v. 35, n. 12, p. 109–126, 1998.

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

CASTRO, K.B. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2013. 117p.

CHAPRA, S.C. *Surface water-quality modelling*. New York: McGraw-Hill, 1997.

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

CRUZ, J.C. Disponibilidade hídrica para outorga: Avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil: Tese (Doutorado em Engenharia), 2001.

CRUZ, J.C.; SILVEIRA, G.L. Disponibilidade hídrica para outorga (I): avaliação por seção hidrológica de referência. *REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 4, n. 2, p. 51–64, 2007.

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. Gestão da água, gestão da seca: a centralidade do açude no gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, 2018.

DANTAS, J.C. Processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Taperoá. Departamento de Geociências, p. 80, Monografia, 2016.

DEUS, L.A.B. Espaço e tempo como subsídios à construção de cenários de uso e cobertura da terra para o planejamento ambiental na Amazônia: o caso da bacia do Rio Acre. Tese (Doutorado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 400 f., 2013.

Di LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G.; NEITSCH, S.L. ArcView Interface for SWAT2000 - User's guide. Temple - Texas. Disponível em <http://swat.tamu.edu/media/1293/swatav2000.pdf>, 2002.

EASTMAN, J. R. Manual IDRISI TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling System. Clark Labs, 2016. 393 p., 2016.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de Informação de Solos Brasileiros. Disponível em: https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html. Acesso em: 8 set. 2016.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, RJ: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1979. v. 2008

FERRARI, A.L. Variabilidade e tendência da temperatura e pluviosidade nos municípios de Pirassununga, Rio Claro, São Carlos e São Simão (SP): Estudo sobre mudança climática de curto prazo em escala local. São Carlos: Tese de Doutorado, Escola de Enga de São Carlos, 2012.

FERREIRA, V.O. Paisagem, recursos hídricos e desenvolvimento econômico na bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

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.

FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J.C.; SANTIAGO, M.M.F. Water Resources of Ceará and Piauí. Global Change and Regional Impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid northeast of Brazil, p. 87–94, 2003.

GALVÍNCIO, J.D.; SOUSA, F.A.S.; SRINIVASAN, V.S. Balanço hídrico à superfície da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 11, n. 3, p. 135–146, 2006.

GOLMOHAMMADI, G.; RUDRA, R.; DICKINSON, T.; GOEL, P.; VELIZ, M. Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT. Journal of Hydrology, v. 547, p. 375–386, 2017.

GONDIM, R.S.; CASTRO, M.A.H.; EVANGELISTA, S.R.M.; TEIXEIRA, A.S.; JÚNIOR, S.C.F.F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na

Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 43, n. 12, p. 1657–1664, dez. 2008.

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

GUERRA, P.B. A Civilização da Seca. Fortaleza: Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, 1981.

GUIMARÃES, A.O.; MELO, A.D.; CEBALLOS, B.S.O.; GALVÃO, C.O.; RIBEIRO, M.M.R. Aspectos da gestão do açude Epitácio Pessoa (PB) e variação da qualidade de água. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, n. 1, p. 1–8, 2005.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *Journal of Hydrology*, v. 297, n. 1–4, p. 136–161, 2004.

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

HAMDY, O.; ZHAO, S.; SALHEEN, M.A.; EID, Y.Y. Analyses the Driving Forces for Urban Growth by Using IDRISI Selva Models Abouelreesh – Aswan as a Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*. Vol. 9, nº 3, 2017.

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

HE, C.Y.; ZHANG, D.; HUANG, Q.X., ZHAO, Y.Y., 2016. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental and Modeling Software*, 75, 44–58.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico de 2010. Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico de 1970 – Microdados do universo – Brasil. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1974.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico de 1980 – dados gerais, migração, instrução, fecundidade, mortalidade. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1984.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico de 1991 – Resultados do universo relativos às características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1994.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades@. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/v3/cidades/home-cidades>>. Acesso em: 15 dez. 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da população do Brasil por sexo e idade para o período 1980–2050 - Revisão 2004. Metodologias e resultados. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004.

IMPrensa Nacional; Campina Grande: Missão Cumprida. Rio de Janeiro, 1958.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Dados Meteorológicos. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 7 nov. 2016.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Catálogo de Imagens da Divisão de Geração de Imagens. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em: 5 fev. 2015.

JACOMINE, P.K.T. A nova classificação brasileira de solos. Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, v. 5 e 6, p. 161–179, 2009.

KENDALL, M.G. Rank correlation methods. 4. ed. London: Hodder Arnold, 1976.

KHAWALDAH, H.A. A prediction of future land use/land cover in Amman area using GIS based Markov model and remote sensing. Journal of Geographic Information System. Vol. 8, p. 412-427, 2016.

LIEBERTRAU, A.M. Measures of association. Newbury Park, CA: Sage Publications. Quantitative, 1983.

LIMA, J. R. A.; NEVES, D. J. D.; ARAÚJO, L. E.; AZEVEDO, P. V.; Identificação de tendências climáticas no Estado da Bahia. Revista de Geografia (UFPE), v. 28, n. 3, p. 172–187, 2011.

LIMA, M.I.P.; MARQUES, A.C.; LIMA, J.L.M.P. Análise da tendência da precipitação anual e mensal no período 1900-2000, em Portugal Continental. Territorium, v. 12, p. 11–18, 2005.

LIMEIRA, R.C.; SOUSA, F.A.S.; SILVA, V.P.R.; OLIVEIRA, P.T. Tendência das chuvas no Estado da Paraíba (Tendency of the rains in Paraíba State in Brazil). p. 103–109, 2012.

LOPES, J.R.F.; SILVA, D.F. Aplicação do teste de Mann-Kendall para análise de tendência pluviométrica no estado do Ceará. Revista de Geografia, v. 30, n. 3, p. 192–208, 2013.

LÓPEZ, E.; BOCCO, G.; MENDOZA, M.; DUHAU, E. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: a case in Morelia city, Mexico. Landscape Urban and Planning, 55 (4), 271–285, 2001.

LUIZ, C.H.P. Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 141 f., 2014.

MACIEL, A.B.C.; LIMA, Z.M.C. O conceito de paisagem: diversidade de olhares. Sociedade e Território, v. 23, n. 2, p. 159–177, 2011.

MAGALHÃES, A.R.; GLANTZ, M. Socioeconomic impacts of climate variations and policy responses in Brazil. United Nations Environment Program (UNEP), Secretariat for Planning and Coordination State of Ceara (SEPLAN), p. 155, 1992.

MAGALHÃES, I.A.L.; ALMEIDA, K.L.; THIAGO, C.R.L.; JUNIOR, B.S.G.; ZANETTI, S.S.; CECÍLIO, R.A. Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo Brasil. p. 5651–5657, 2013.

MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MARCHIORO, E. Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

MARCUZZO, F.F.N.; ANDRADE, L.R.; MELO, D.C.R. Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chuvas do Estado do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, p. 793–804, 2011.

MARENGO, J.A. Water and climate change. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008.

MATA, L.J.; CAMPOS, M. Latin America. In: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Intergovernmental Panel of Climate Change and of Climate Change, p. 694–734, 2001.

MAXIMIANO, L.A. Considerações sobre o conceito de paisagem. *RA'EGA*, v. 8, n. 8, p. 83–91, 2004.

MEDEIROS, A.M.T. Variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial diária sobre a bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Campina Grande, novembro, 2003.

MEDEIROS, I.C.; SILVA, R.M. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. v. 33, n. 3, 2014.

MEDEIROS, S.S.; CAVALCANTE, A.M.B.; MARIN, A.M.P.; TINÔCO, L.B.M.; SALCEDO, I.H.; PINTO, T.F. Sinopse do censo demográfico para o Semiárido Brasileiro. Campina Grande, PB, Brasil: INSA, 2012.

MELLO, E.L.; OLIVEIRA, F.A.; PRUSKI, F.F.; FIGUEIREDO, J.C. Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 4, p. 635–644, 2008.

MENESES, R.A. Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: O caso de Campina Grande. 2011. 161 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

MESCHIATTI, M.C.; PENEREIRO, J.C. Variabilidade e tendência da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo. Anais do XVI Encontro de Iniciação Científica e I Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da PUC-Campinas, 2011.

- MILHOUS, R.T. Restoring River Substrate Using Instream Flows: The Gunnison and Trinity Rivers. *Engineering Approaches to Ecosystem Restoration*, p. 925–930, 1998.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and the environment. In *The state and movement of water in living organisms*, XIX 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. *Recursos hídricos em regiões semiáridas: Estudos e aplicações*, p. 1–27, 2012.
- MORAES, A.C.R. *Geografia: Pequena história crítica*. 8a ed. São Paulo: Editora Hucitec, 1988.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- MOURA, E.M. Avaliação da disponibilidade hídrica e da demanda hídrica no trecho do Rio Piranhas-Açu entre os açudes Coremas-Mãe D'Água e Armando Ribeiro Gonçalves. *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária*, v. 1, p. 140, 2007.
- NAÇÕES UNIDAS. Métodos para preparar projeções de população por sexo e idade - Manual III. Rio de Janeiro: IBGE, 1978.
- NASCIMENTO, S.S.; ALVES, J.J.A. *Ecoclimatologia Do Cariri Paraibano*. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 2, n. 3, p. 28–41, 2008.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part i-a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282–290, 1970.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; 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, 2011. 647p.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.R.K.; WILLIAMS, J.R. *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute, p. 1–647, 2011.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. *Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation*. Agricultural Research Service. 2009.
- NOBRE, C.A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. *Parcerias Estratégicas*, v. 6, n. 12, p. 239–258, 2001.
- NOBRE, P.; MELO, A.B.C. Variabilidade Climática Intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. *Revista Climanalise*, v. ano 2, n. 1, p. 1–10, 2003.
- NOVAES, L.F. *Modelo Para a Quantificação Da Disponibilidade Hídrica Na Bacia Do Paracatu*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005.

OLIVEIRA, F.M.B.; AMBROZEVICIUS, A.P. Açude Epitácio Pessoa – Boqueirão (PB) situação hídrica e perspectivas com a chegada da água da transposição do Rio São Francisco. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017.

OLIVEIRA, G.M.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; GALVÃO, C.O.; LEITÃO, T.J.V. Estimativa da evaporação e análise do uso do coeficiente (K_p) do tanque “CLASSE A” nas regiões do Cariri e Sertão da Paraíba. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 73-83, 2005.

OLIVEIRA, L.F.C.; FIOREZE, A.P.; MEDEIROS, A.M.M.; SILVA, M.A.S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 11, p. 1186–1192, 2010.

PENEREIRO, J.C.; ORLANDO, D.V. Análises De Tendências Em Séries Temporais Anuais De Dados Climáticos E Hidrológicos Na Bacia Do Rio Parnaíba Entre Os Estados Do Maranhão E Piauí / Brasil. Revista Geográfica Acadêmica, v. 7, n. 2, p. 5–21, 2013.

PEREIRA, D.R.; MARTINEZ, M.A.; SILVA, D.D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 5, p. 149–163, 2016.

PETTITT, A.N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. Journal of the Royal Statistical Society, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

PINTO, H.S.; JUNIOR, J.Z.; ZULLO, S.A. Oscilações pluviométricas temporais no Estado de São Paulo 6o Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 1989. Disponível em: <<http://www.sbagro.org.br/bibliotecavirtual/arquivos/4815.pdf>>

PRESTON, S.H.; HEUVELINE, P.; GUILLOT, M. Demography: measuring and modeling population processes. Oxford: Blackwell, p. 168-175, 2001.

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

REBOUÇAS, A.D.C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. Estudos Avançados, v. 11, n. 29, p. 127–154, 1997.

RÊGO, J.C.; GALVÃO, C.O.; RIBEIRO, M.M.R.; ALBUQUERQUE, J.P.T.; NUNES, T. H. C. A crise do abastecimento de Campina Grande: Atuações dos gestores, usuários, poder público, imprensa e população. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015.

ROSADO, J.; MORAIS, M.M. Estratégias de gestão da água em situação de escassez: regiões semiáridas e mediterrânicas. Sustentabilidade em Debate, v. 1, n. 2, p. 31-46, 2010.

SALMI, T.; MÄÄTTÄ, A.; ANTTILA, P.; RUOHO-AIROLA, T.; AMNELL, T. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen’s slope estimates –the Excel template application MAKESENS. Helsinki: Finnish Meteorological Institute, 2002.

SALVIANO, M.F.; GROppo, J.D.; PELLEGRINO, G.Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016.

SAMPAIO, D.M. Modelagem da cobertura do solo urbano no Vetor Norte da RMBH e projeções de cenários futuros considerando as novas infraestruturas viárias previstas. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 103 f., 2014.

SANGERMANO, F.; TOLEDANO, J.; EASTMAN, J.R. Land cover change in the Bolivian Amazon and its implications for REDD+ and endemic biodiversity. *Landscape Ecology*. Vol. 27, p. 571–584, 2012.

SANTOS, J.Y.G. Avaliação das perdas de água e solo no semiárido Paraibano mediante chuva simulada e modelagem hidrossedimentológica. João Pessoa, João Pessoa, PB, Brasil: Dissertação de Mestrado, 2011.

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

SEGUNDO NETO, F.V.A. Análise espacial das obras do projeto de integração do Rio São Francisco (Eixo Leste) no estado da Paraíba. Monografia de graduação. Curso de Geografia, 2014. 70p.

SEMARH – Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais do Estado da Paraíba. Resultados do Levantamento Batimétrico do Reservatório Epitácio Pessoa, Boqueirão/PB. Campina Grande: SEMARH/LMRS, 2004.

SEN, P.K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.

SHIMABUKURO, Y.E.; VERONA, J.D.; BERNARDES, T.; PEREIRA, G. Avaliação da qualidade do produto Globcover para o Estado do Mato Grosso, Brasil, por meio de imagens do Google Earth e séries temporais de índices de vegetação derivados de imagens MODIS. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Foz do Iguaçu: Paraná, Brasil, p. 3486-3493, 2013.

SILVA FILHO, L.G. Síntese histórica de Campina Grande - 1670 a 1963. Joao Pessoa: Editora Grafiset, 2005.

SILVA, R.M. Análise da perda de solos na bacia do rio Tapacurá mediante previsão climática e modelos de erosão. p. 133, Tese de Doutorado, 2010.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MARANHÃO, K.U.A.; SILVA, A.M.; LIMA, V.R.P. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. *Earth Sciences Research Journal*, v. 22, n. 4, p. 175-186, 2018.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; BARBOSA, R.C.; Rainfall trends over 40 years in the Cobres River basin, Portugal: variability and impacts. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, v. 366, n. June 2014, p. 127–128, 2015.

- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; SILVA, V.C.L.; MEDEIROS, I.C. Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, v. 77, n. 2, p. 1205-1221, 2015.
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, L.P.; FREIRE, P.K.M. Space-time variability of rainfall and hydrological trends in the Alto São Francisco River basin. *IAHS Publication*, v. 359, n. May 2016, p. 48-54, 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 da precipitação na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. *Sociedade & Natureza*, v. 22, n. 2, p. 357-372, 2010.
- 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. Report on the expert consultations on revision of FAO methodologies for crop water requerimentos. Rome: FAO, 1991. 45p.
- SOUZA, A.S. Valoração da paisagem da unidade de conservação Parque Estadual do Poeta e Repentista Juvenal de Oliveira – Campina Grande – PB. Universidade Federal da Paraíba, 2017.
- 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, 30 set. 2009.
- SOUZA, F. B. Modernidade à conta gotas: por uma história do abastecimento de água em Campina Grande - PB (1950-1958). [s.l.] Universidade Federal de Campina Grande, 2013.
- SUASSUNA, J.; AUDRY, P. A salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação no sertão nordestino: Caracterização, variação sazonal e limitações de uso. *CNPq*, p. 128, 1995.
- SUDENE, Resolução Nº 115 de 23 de novembro de 2017. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Ministério da Integração Nacional, Brasília – DF, Publicado em 05/12/2017, Edição 232, Seção 1, Páginas 26-27-34.
- TUCCI, C.E.M. Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos. *Agência Nacional das Águas*, v. 1, n. 1, p. 150, 2002.
- TUCCI, C.E.M. Previsão de médio prazo da afluência de açudes com base na previsão climática. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
- ULIANA, E.M.; SILVA, D.D.; ULIANA, E.M.; RODRIGUES, B.S.; CORRÊDO, L.P. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. *Revista Ambiente e Água*, v. 10, n. 1, p. 445-458, 2015.
- UZEIKA, T. Aplicabilidade Do Modelo Swat (Soil and Water Assessment Tool) Na Simulação Da Produção De Sedimentos Em Uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural. Dissertação de Mestrado, 2009. 129p.

VELDKAMP, T.I.E.; WADA, Y.; MOEL, H.; KUMMU, M.; EISNER, S.; AERTS, J.C.J.H.; WARD, P.J. Changing mechanism of global water scarcity events: Impacts of socioeconomic changes and inter-annual hydro-climatic variability. *Global Environmental Change*, v. 32, p. 18–29, 2015.

VIEIRA, V.P.P.B. Desafios da Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Semiárido. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 717, 2003.

WALDVOGEL, B.C.; FERREIRA, C.E.C.; YAZAKI, L. M.; GODINHO, R.E.; PERILLO, S.R. Projeção da população paulista como instrumento de planejamento. *São Paulo em Perspectiva*, v. 17, n. 3–4, p. 67–79, 2003.

XAVIER, A.P.C. Modelagem temporal da dinâmica do uso e ocupação do solo nas perdas e deposição de sedimentos na bacia do rio Tapacurá (PE). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, 2017, 102p.

XIE, W.; HUANG, Q.; HE, C.; ZHAO, X. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services: A case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 84, 183-193, 2018.

ZELÉNÁKOVÁ, M.; PURCZ, P.; POÓROVÁ, Z.; ALKHALAF, I.; HLAVATÁ, H.; PORTELA, M.M. Monthly Trends of Precipitation in Gauging Stations in Slovakia. *Procedia Engineering*, v. 162, p. 106–111, 2016.