

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIA HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

PEDRO DOS SANTOS FERREIRA

MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA E A DISPONIBILIDADE HÍDRICA FRENTE ÀS  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RECIFE

2017

PEDRO DOS SANTOS FERREIRA

MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA E A DISPONIBILIDADE HÍDRICA FRENTE ÀS  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Área de concentração: Gestão e Políticas Ambientais

Orientadora: Werônica Meira de Souza  
Coorientadora: Josiclêda Domiciano Galvíncio

Recife

2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Janeide Pereira da Silva, CRB4-1262

F383m Ferreira, Pedro dos Santos.  
Modelagem hidrológica para estimativa da vazão na bacia hidrográfica do rio Brígida e a disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas / Pedro dos Santos Ferreira. – 2017.  
89 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora : Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Werônica Meira de Souza.  
Coorientadora : Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Josiclêda Domiciano Galvêncio  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.  
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2017.  
Inclui Referências.

1. Meio ambiente. 2. Hidrologia. 3. Mudanças climáticas – Aspectos ambientais. 4. Demografia. 5. Modelagem hidroclimática. I. Souza, Werônica Meira de (Orientadora). II. Galvêncio, Josiclêda Domiciano (Coorientadora). III. Título.

363.7 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2017-161)

PEDRO DOS SANTOS FERREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA E A DISPONIBILIDADE HÍDRICA FRENTE  
ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambientes da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 23/02/2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Weronica Meira de Souza  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Ranyere Silva Nóbrega  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Valéria Sandra de Oliveira Costa  
Universidade Estadual de Campinas

---

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro  
Universidade Estadual de Campinas

*Dedico este trabalho a toda minha família, assim como às pessoas que de alguma forma contribuíram com minha caminhada até aqui.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter colocado em minha vida todas as pessoas que de alguma forma, direta ou indireta, contribuíram para minha formação moral, intelectual e profissional.

À toda minha família, base para tudo. Meus tios Rômulo e Remo, pelos conselhos e ensinamentos; aos meus avós; à minha querida tia Miriam Ferreira, que comemorou todas as minhas conquistas com um entusiasmo ímpar; ao meu irmão Henrique Ferreira; aos meus pais, Zélia Maria e Ascedino Ferreira, por tudo, tudo mesmo. Um agradecimento especial ao meu pai, que fez tudo que consegui até hoje parecer fácil diante de todos os seus sacrifícios.

À minha querida Viviane Gomes, que foi fundamental nessa longa caminhada que se iniciou na graduação. Obrigado por tudo, pelo incentivo, pelo apoio e carinho em todos os momentos.

Aos meus professores da educação básica até a superior. Em especial à professora Josiclêda Galvêncio e Weronica Souza, por todo o apoio e contribuições para o desenvolvimento do presente estudo. À Valéria Costa, pelo apoio e contribuições acadêmicas.

Aos meus amigos e colegas de sala da UFPE e de laboratório! Em especial, aos companheiros de SERGEO: Johnny Mayron, Hewerton Alves, Antonio Marcos, Ygor Cristiano, Rodrigo Queiroga, Thiago Henrique, João Antônio, Luciana Mayla, Henrique Ferreira, Manuella Vieira, Elizabeth Cavalcanti, Pedro Paulo, Any Sena, Kézia e Yenê Paz.

Agradeço também ao amigo Josimar Gurgel, por todo tempo dedicado nos momentos de dúvidas e por todo o incentivo. À Renata Araújo, por toda a ajuda que me foi dada em momentos importantes nessa caminhada até aqui.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida e ao projeto CNPq SUPer: 446254/2015-0.

## RESUMO

Entre os problemas de ordem ambiental mais discutidos pela sociedade contemporânea, destaca-se a relação mudanças climáticas e recursos hídricos. No Brasil, uma das regiões mais vulneráveis ao processo é o Nordeste, em especial o semiárido. Entretanto, a extensão dos efeitos biofísicos e socioeconômicos ainda são incertos, o que dificulta a ação de gestores públicos quanto à tomada de decisão. Neste sentido, o objetivo central da presente pesquisa é estimar a vazão do rio Brígida utilizando o modelo hidrológico SWAT e avaliar o grau de disponibilidade hídrica *per capita*, frente aos cenários de mudanças climáticas do IPCC. Inicialmente, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto para classificação supervisionada de imagens orbitais, a partir de informações disponíveis no banco de dados do Google Earth. Em seguida, o mapa gerado foi adicionado ao modelo SWAT, juntamente com informações de solos, clima e relevo. Os resultados para o mapeamento de uso e cobertura da terra comprovaram a eficiência do método adotado, possibilitando identificar que as categorias savana estépica e agricultura de sequeiro ocupam cerca de 90% da bacia. Em relação a calibração do modelo hidrológico SWAT para a vazão anual da bacia do rio Brígida, obteve-se resultados classificados como muito bons, com Nash-Soutcliffe = 0,92, Pearson = 0,92, PBIAS = 0,6%. Quanto a estimativa da disponibilidade hídrica para o período de calibração, a aplicação do índice do Índice de Exploração de Água apontou que a bacia de modo, geral, apresenta grande variação da situação hídrica ao longo dos anos. Em relação ao quadro de disponibilidade hídrica *per capita*, a situação é preocupante para a maior parte dos anos analisados, visto a população esteve sob Estresse Hídrico. Para os cenários climáticos futuros, os modelos empregados apontaram resultados distintos. O CCCMA, apresentou incremento na precipitação pluvial, enquanto o MIROC redução. Apesar disto, os dois cenários de disponibilidade hídrica, apontam situação de Estresse Hídrico e Escassez hídrica. A configuração deste resultado se deve principalmente ao crescimento da população na bacia, projetado até o ano de 2060, e possível manutenção do atual padrão de infraestrutura. Deste modo, conclui-se que a combinação de mudanças climáticas e crescimento populacional pode ser decisiva para o agravamento de uma situação hídrica já preocupante. Os projetos de integração de bacias hidrográficas, que buscam combater a seca no Semiárido precisam levar em consideração os efeitos das mudanças ambientais sobre os recursos hídricos.

**Palavras-chave:** SWAT. Modelagem hidroclimática. Demografia.

## ABSTRACT

Among the environmental problems most discussed by contemporary society, we highlight the relation between climate change and water resources. In Brazil, one of the regions most vulnerable to the process is the Northeast, especially the semi-arid. However, the extent of biophysical and socioeconomic effects are still uncertain, which makes it difficult for public managers to take decisions. In this sense, the main objective of this research is to estimate the flow of the Brígida river using the SWAT hydrological model and to evaluate the degree of water availability per capita, in face of the IPCC climate change scenarios. Initially, remote sensing techniques were used for supervised classification of orbital images, based on information available in the Google Earth database. Then the generated map was added to the SWAT model, along with soil, climate and relief information. The results for land use and land cover mapping proved the efficiency of the method adopted, making it possible to identify that the categories of savanna and rainfed agriculture occupy about 90% of the basin. In relation to the calibration of the SWAT hydrological model for the annual flow of the Brígida river basin, results were classified as very good, with Nash-Soutcliffe = 0.92, Pearson = 0.92, PBIAS = 0.6%. Regarding the estimation of the water availability for the calibration period, the application of the index of the Water Exploration Index indicated that the basin, in general, presents a great variation of the water situation at the time of the years. Regarding the water availability framework per capita, the situation is worrying for most of the analyzed years, since the population was under Water stress. For future climate scenarios, the models employed showed different results. The CCCMA, presented increment in the rainfall, while the MIROC reduction. Despite this, the two scenarios of water availability point to the situation of Water Stress and Water Scarcity. The configuration of this result is mainly due to the population growth in the basin, projected until the year 2060, and possible maintenance of the current infrastructure standard. In this way, it can be concluded that the combination of climate change and population growth can be decisive for the aggravation of an already worrying water situation. Watershed integration projects that seek to combat drought in the semi-arid region need to take into account the effects of environmental changes on water resources.

**Keywords:** SWAT. Environmental modeling. Population.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	31
Figura 2 - Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Brígida.....	33
Figura 3 - Distribuição espacial dos tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	34
Figura 4 - Distribuição espacial dos pontos gerados para a bacia hidrográfica do rio Brígida.	36
Figura 5 - Distribuição espacial dos pontos utilizados para classificação dos usos e coberturas observados por meio das imagens de satélite do banco de dados do Google Earth Pro para a bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	36
Figura 6 - Visualização ampliada de um dos 3 mil pontos dispostos na área de estudo. ....	37
Figura 7 - Distribuição espacial das estações pluviométricas e meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	39
Figura 8 - Distribuição espacial dos postos fluviométricos da bacia hidrográfica do rio Brígida empregados na etapa de calibração do modelo hidrológico SWAT. ....	51
Figura 9 - Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida para o ano de 2015. ....	53
Figura 10 - Nível de significância estatística dos parâmetros mais sensíveis na simulação final. ....	56
Figura 11 - Comparação entre a vazão média anual observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT para o rio Brígida. ....	60
Figura 12 - Comparação entre a vazão média anual observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT para o rio Brígida. ....	62
Figura 13 - Coeficiente de determinação linear de calibração do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	63
Figura 14 - Comparação entre a vazão média anual observada e a estimada para validação do modelo hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	64
Figura 15 - Comparação entre a vazão média mensal observada e a estimada para validação do modelo hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	64
Figura 16 - Índice de Exploração Hídrica (IEA) para análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	66
Figura 17 - Disponibilidade hídrica per capita da bacia hidrográfica do rio Brígida entre os anos de 2001 e 2008, estimada a partir do cociente entre a média anual de água	

armazenada nos principais reservatórios presentes na bacia e o número de habitantes. ....	68
Figura 18 - Padrão da precipitação pluviométrica mensal da bacia hidrográfica do rio Brígida, com base na atual normal climatológica (1961-1991), baseline modelado pelo CCCMA (1961-1991) e projeção para o período de 2046 a 2064. ....	70
Figura 19 - Padrão da precipitação pluviométrica mensal da bacia hidrográfica do rio Brígida, com base na atual normal climatológica (1961-1991), baseline modelado pelo MIROC (1961-1991) e projeção para o período de 2046 a 2064. ....	71
Figura 20 - Índice de Exploração de Água na bacia hidrográfica do rio Brígida, com base em cenários climáticos dos modelos CCCMA e MIROC e projeção da demanda hídrica. ....	73
Figura 21 - Projeção da disponibilidade hídrica per capita, calculada a partir da razão a soma da capacidade máxima de armazenamento dos principais reservatórios inseridos na bacia hidrográfica do rio Brígida e total de habitantes por década. ....	75
Figura 22 - Disponibilidade hídrica per capita na bacia hidrográfica do rio Brígida, com base na projeção da população e cenários climáticos projetados pelos modelos climatológicos CCCMA e MIROC. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros gerados pelo WGN com base nos dados meteorológicos das estações utilizadas. ....	40
Tabela 2 - Classes de solos encontrados na bacia e seus respectivos grupos hidrológicos. ....	45
Tabela 3 - Parâmetros gerados pela Macro.xls <i>user soil</i> com base nos dados dos solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	45
Tabela 4 - Capacidade de armazenamento dos principais reservatórios inseridos na bacia hidrográfica do rio Brígida .....	46
Tabela 5 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual do rio Brígida. ....	58
Tabela 6 - Resumo das estatísticas empregadas para análise de desempenho do modelo hidrológico SWAT para simulação da vazão anual da bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	59
Tabela 7 - Resumo das estatísticas empregadas para análise de desempenho do modelo hidrológico SWAT para simulação da vazão mensal da bacia hidrográfica do rio Brígida. ....	61
Tabela 8 - Correlação entre a vazão média anual (2001 a 2008) da bacia hidrográfica do rio Brígida com as anomalias de Temperatura de Superfície do Mar do Atlântico Norte e Sul. ....	68

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
<b>3.1</b>	<b>Uso e cobertura da terra</b> .....	17
3.1.1	Classificadores de imagens orbitais.....	19
<b>3.2</b>	<b>Modelagem hidrológica</b> .....	21
<b>3.3</b>	<b>Mudanças climáticas</b> .....	25
3.3.1	Modelos climáticos.....	26
3.3.2	Mudanças climáticas e os recursos hídricos.....	28
3.3.3	Disponibilidade hídrica.....	29
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	31
<b>4.1</b>	<b>Localização e caracterização da área de estudo</b> .....	31
4.1.1	Tipologia Climática.....	32
4.1.2	Hipsometria e pedologia da bacia.....	32
<b>4.2</b>	<b>Procedimentos metodológicos</b> .....	34
4.2.1	Mapeamento do uso e cobertura da terra.....	34
4.2.2	Classificação guiada com auxílio de imagens do Google Earth.....	35
4.2.3	Algoritmo de classificação.....	37
4.2.4	Associação do uso da terra com o banco de dados americano.....	38
<b>4.3</b>	<b>Banco de dados climatológicos</b> .....	38
<b>4.4</b>	<b>Mapeamento e características físicas dos solos</b> .....	44
<b>4.5</b>	<b>Modelo digital de elevação</b> .....	45
<b>4.6</b>	<b>Reservatórios</b> .....	46
<b>4.7</b>	<b>Abastecimento do modelo hidrológico SWAT</b> .....	46
4.7.1	Criação do projeto e edição do banco de dados.....	46
4.7.2	Delimitação e Subdivisão da Bacia.....	47
4.7.3	Definição das unidades de resposta hidrológica.....	47
<b>4.8</b>	<b>Simulações do modelo hidrológico SWAT</b> .....	48
4.8.1	Manejo da vegetação.....	50
<b>4.9</b>	<b>Calibração do modelo hidrológico SWAT</b> .....	50

<b>4.10</b>	<b>Cenários de disponibilidade hídrica</b> .....	52
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
<b>5.1</b>	<b>Mapeamento do uso e cobertura da terra</b> .....	53
<b>5.2</b>	<b>Calibração do modelo hidrológico SWAT</b> .....	56
5.2.1	Análise de sensibilidade dos parâmetros .....	56
5.2.1	Análise de desempenho do modelo hidrológico SWAT.....	58
5.2.2	Comportamento da vazão anual.....	59
5.2.3	Análise de desempenho do modelo para a simulação da vazão mensal .....	61
5.2.4	Validação do modelo hidrológico SWAT .....	63
<b>5.3</b>	<b>Disponibilidade hídrica</b> .....	66
5.3.1	Índice de Exploração de Água .....	66
5.3.2	Disponibilidade hídrica <i>per capita</i> .....	68
<b>5.4</b>	<b>Disponibilidade hídrica frente aos cenários de mudanças climáticas e demográficas.</b> .....	69
5.4.1	Projeção da Precipitação pluviométrica.....	69
5.4.2	Projeção do Índice de Exploração de Água .....	73
5.4.2	Projeção da Disponibilidade Hídrica <i>Per capita</i> .....	75
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	79
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81

## 1 INTRODUÇÃO

Os debates relacionados à segurança hídrica continuam a ganhar corpo nas esferas científicas e políticas, impulsionados principalmente pelo agravamento do que muitos pesquisadores e gestores públicos vêm chamando de “crise hídrica”. Segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU), atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas não têm acesso seguro à água potável. Este quadro tende a agravar-se até o ano de 2025, quando dois terços da população mundial residirá em áreas de escassez hídrica (AHMED et al., 2015; SORENSON; MORSSINK; CAMPOS, 2011).

Outra questão importante diz respeito aos possíveis impactos das mudanças climáticas globais sobre os recursos hídricos. Espera-se que o aquecimento adicional de 0,6°C constatado durante a segunda metade do século XX, e o projetado até o ano de 2100 (2,6 °C a 4,8 °C), segundo relatórios publicados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), produza mudanças significativas na distribuição espaço-temporal da água. Os efeitos sobre a disponibilidade de água devem variar de região para região, com potencial para agravar o problema da crise hídrica em localidades onde a demanda é superior à oferta (IPCC, 2007; 2013).

No quadro atual, as mudanças na disponibilidade hídrica decorrem da complexa inter-relação que abarca fatores naturais e socioeconômicos. Nesse sentido, verifica-se que o aumento da pressão sobre os recursos hídricos encontra-se atrelado a fenômenos como variabilidades climáticas, crescimento populacional, desigualdades sociais, mudanças no uso e cobertura das terras, exploração dos recursos naturais, entre outros (BAKER; MILLER, 2013; BOSSIO; GEHEB; CRITCHLEY, 2010; DAVIES; SIMONOVIC, 2011).

No continente asiático, mais precisamente na China, Wang et al. (2009) constataram que o referido dinamismo tem afetado diversos rios localizados na porção norte do país, promovendo significativa redução no volume de suas vazões. Na bacia hidrográfica do rio *Hai*, por exemplo, a taxa média de diminuição de fluxo chegou à 41% nas últimas décadas. Em bacias hidrográficas de importância estratégica como as dos rios *Liao*, *Yellow* e *Huai*, este percentual tem variado entre 9 - 15%, afetando principalmente a produtividade agrícola.

Em países da África, como Tanzânia, Camarões e República Democrática do Congo, as vazões observadas nos principais rios da região vêm apresentando redução dos seus fluxos desde a década de 1980. Os impactos recaem principalmente sobre a redução da disponibilidade de água para vários setores econômicos, comprometendo a produção de alimentos, geração de

energia e sociedade em geral. Outros efeitos como o aumento das doenças de veiculação hídrica, desemprego e migrações em massa também são observados e tendem a agravar-se ainda mais.

No Brasil, os problemas relacionados a escassez hídrica são sentidos em regiões onde a situação, teoricamente, seria confortável. Um bom exemplo são os recentes eventos de seca que atingiram Sudeste do país, em especial o estado de São Paulo, entre os anos de 2013 e 2015. As reduções do volume das chuvas afetaram as vazões de várias bacias hidrográficas, onde verificou-se volumes bem inferiores à média histórica. No campo econômico, as estimativas iniciais apontam que 60 mil estabelecimentos industriais, que representam 60% da composição do Produto Interno Bruto (PIB) paulista, foram afetados pela falta de água. Quanto ao setor de alimentos, produtos como o tomate e alface, apresentaram alta de 30% nos valores, impulsionados também pela elevação dos custos com a produção de energia elétrica (MARENGO et al., 2015).

No Nordeste, região onde o problema da escassez hídrica perdura há décadas, com históricos de mortes e graves prejuízos socioeconômicos, o quadro resulta principalmente do menor potencial hídrico, para a área semiárida, e mau gerenciamento dos recursos hídricos. Marengo (2006) pontua que nos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, a quantidade de água por habitante é insuficiente frente a demanda, expondo a população a situações de escassez hídrica por longos períodos.

Quando considerados os possíveis cenários de mudanças climáticas, dentre as regiões do Brasil, a do Nordeste deve ser uma das mais afetadas pelas alterações nos padrões de precipitação pluvial e temperatura do ar. Problemas relacionados a desertificação, cada vez mais comuns no Semiárido, devem ser agravados, contribuindo para a perda da fertilidade das terras (SANTOS; GALVÍNCIO, 2013). De acordo com Ferreira et al. (2016), o declínio da disponibilidade de água para a agricultura, associado ao aumento da temperatura média do ar, previsto para o ano de 2050, deve reduzir as áreas agricultáveis em vários municípios inseridos na região.

Com vistas garantir a oferta de água para as populações semiáridas, o Governo Federal vem investindo no desenvolvimento do projeto de transposição do rio São Francisco. Em Pernambuco, as bacias que devem receber águas drenadas por extensas linhas de canais são as do rio Moxotó, Terra Nova e Brígida (BRASIL, 2004). Por outro lado, há de se destacar algumas críticas feitas ao projeto, as quais são direcionadas ao seu caráter empresarial, que busca na verdade ampliar as áreas de agricultura irrigada, responsáveis pelo elevado consumo de água na região, assim como a não relevância dos possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos.

A bacia hidrográfica do rio Brígida, por exemplo, é alvo frequente de especulações econômicas. Os recursos naturais na região são intensamente explorados em função de atividades como a extração de gesso e madeira, práticas agrícolas e pecuárias. Os efeitos da referida dinâmica têm potencial para agravar problemas relacionados à disponibilidade de água, porém, a extensão dos danos ainda é incerta, principalmente quando se insere nas discussões os problemas relacionados às mudanças climáticas.

Diante do exposto, no que concerne a bacia hidrográfica do rio Brígida, parte-se da hipótese de que, caso se confirmem os cenários previstos pelo IPCC, as mudanças climáticas devem agravar os problemas relacionados a disponibilidade de água *per capita* na região. Deste modo, o objetivo central do presente estudo consiste em investigar a relação entre as mudanças climáticas e os recursos hídricos na unidade ambiental mencionada.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Estimar a vazão do rio Brígida utilizando o modelo hidrológico SWAT, e avaliar o grau de disponibilidade hídrica para a população inserida na bacia, frente aos cenários de mudanças climáticas do IPCC.

### 2.2 Objetivos específicos

- Mapear o atual estado de uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida;
- Calibrar e validar o modelo SWAT para estimativa da vazão do rio Brígida;
- Projetar e analisar a vazão do rio Brígida com base nos cenários climáticos do IPCC;
- Determinar a disponibilidade hídrica *per capita* na bacia hidrográfica do rio Brígida a partir de cenários climáticos e evolução populacional.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Uso e cobertura da terra

De acordo com manual da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 1999), o uso da terra compreende um conjunto de atividades e práticas que determinados grupos humanos empreendem sobre a superfície terrestre. Estas superfícies podem ser compostas por diferentes estruturas, modeladas a partir da atuação de forças naturais e ações sociais.

Nas últimas décadas, as mudanças no uso e cobertura das terras têm se configurado como uma das principais forças motrizes para uma série de problemas ambientais observados em escalas geográficas variadas. Um bom exemplo, são as questões relacionadas a redução da disponibilidade hídrica, mudanças climáticas, desertificação e perda da biodiversidade. Questões amplamente discutidas e que têm relação direta com práticas antrópicas como a remoção da cobertura vegetal natural para a introdução de áreas de pastagem, agricultura ou até mesmo expansão dos perímetros urbanos (BAKER; MILLER, 2013; HEISTERMANN; MÜLLER; RONNEBERGER, 2006)

Dentre os problemas ambientais citados, os decorrentes da relação mudanças climáticas e recursos hídricos estão entre os mais investigados pela comunidade científica. Ao visitar a vasta literatura que trata sobre a questão, percebe-se que numerosos trabalhos voltados para essa linha de pesquisa, entre eles os conduzidos por Abdalla et al. (2013), Legesse, Vallet-Coulomb e Gasse (2003), Li et al. (2009), López-Moreno et al. (2014), Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013), relatam a grande importância do uso da terra para compreensão dos processos hidroclimáticos.

Dentro desse contexto, cresceu entre os pesquisadores inseridos em várias ramificações do meio científico o uso de representações cartográficas voltadas para o monitoramento ambiental. Em meio a esta tendência, a obtenção de dados espaciais através de sensoriamento remoto tem se configurado como um dos principais mecanismos que contribuíram e contribuem para a difusão de técnicas mais eficientes no que concerne ao mapeamento da superfície terrestre.

Desde a consolidação do programa Landsat na década de 70, quando foi lançado o primeiro satélite (Landsat 1) para monitoramento territorial, vários métodos para obtenção de dados da superfície foram subsequentemente desenvolvidos e melhorados. Um bom exemplo são os programas SPOT, ALOS, CBERS, ENVISAT, entre outros. Todo esse aparato

tecnológico vem sendo empregado para a construção de um extenso acervo de imagens orbitais, o qual tem sido disponibilizado em uma série de *sites* ligados a instituições públicas e privadas (NOVO, 2008).

Com uma série de dados correspondente a um período de 40 anos, as informações geradas pelos satélites Landsat estão entre as mais acessadas na atualidade, apesar do acervo só ter sido amplamente disponibilizado, gratuitamente, a partir de 2008. De modo geral, este banco de dados tem subsidiado uma série de estudos sobre dinâmica de uso e cobertura das terras, entre os quais, destacam-se os conduzidos por Brooks et al. (2014), Caten, Minella e Madruga (2012), Coelho et al. (2014), Cunha et al. (2012), Huang et al. (2010), Kennedy, Cohen e Schroeder, (2007), ROY et al. (2014) e Zhu e Woodcock (2014).

Nos trabalhos supracitados é perceptível a preocupação dos autores com a qualidade e validade dos mapas de uso da terra gerados a partir de imagens orbitais, exigência cada vez mais comum em programas de monitoramento, inventários nacionais e modelagem de sistemas ambientais. Geralmente, este procedimento é realizado a partir do cruzamento das informações obtidas através de sensoriamento remoto com dados coletados em campo. Entretanto, em muitas ocasiões, o levantamento dessas informações não é uma tarefa relativamente simples ou possível, seja pela dificuldade de acesso às áreas, tempo demandado ou limitação de recursos financeiros (WULDER et al., 2006).

Um dos procedimentos que vem sendo adotados para contornar o problema é o uso de imagens de satélites de alta resolução espacial, disponibilizadas gratuitamente em programas como o Google Earth Pro. De acordo com Fritz et al. (2009), as imagens integradas ao referido *software* possuem detalhamento superficial suficientemente alto para que o observador possa distinguir as estruturas dispostas no espaço, subsidiando a produção de mapas com grande nível de confiabilidade.

Um dos primeiros estudos de notoriedade que contribuíram para a consolidação do método e auxiliaram diversas outras investigações, foi conduzido por Biradar et al. (2009). O objetivo central consistiu em empreender um mapeamento global para identificar áreas de agricultura de sequeiro. A partir das imagens disponíveis no Google Earth, os autores realizaram uma amostragem onde obtiveram 1009 pontos, distribuídos aleatoriamente, e mais 915 originados de dados aferidos em campo. As informações serviram para avaliar a acurácia do mapeamento, cujos resultados estatísticos variaram de 92 e 98% para o teste de Kappa.

O método também tem sido empregado para atualizar e melhorar mapeamentos antigos e pouco precisos. Um exemplo disso é o trabalho conduzido por Pekkarinen, Reithmaier e Strobl (2009) para o continente europeu. Os autores classificaram 415 cenas do satélite Landsat

7 para mapear a cobertura florestal em todo o território. A amostragem para validação do produto comportou uma média de 1041 pontos por cena. Os resultados demonstraram que o nível de precisão geral do mapeamento foi de 88,4%, com um intervalo de confiança ao nível de 95%.

Outro estudo bem sucedido, de grande escala geográfica, foi desenvolvido por Schneider, Friedl e Potere (2010) para mapear áreas urbanas globais, usando imagens do sensor MODIS. Nessa campanha, os pesquisadores recorreram ao banco de dados do Google Earth a fim de guiar o processo de classificação e validar o produto final. Os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que foi possível identificar a distribuição das cidades e seus limites. A análise estatística empregada para validação indicou um nível de acurácia entre 82,8 e 91%.

Seguindo esta tendência, Dorais e Cardille (2011) empregaram o procedimento conduzido por Schneider, Friedl e Potere (2010), desta vez para avaliar a dinâmica de desmatamento na ilha de Borneo, na Ásia. Os pesquisadores geram cerca de 500 pontos para áreas cobertas por imagens de alta resolução espacial integradas ao Google Earth, o que permitiu a interpretação visual da cobertura da terra. Os pontos foram convertidos em polígonos e posteriormente combinados com as assinaturas espectrais dos alvos imageados pelo sensor MODIS para classificar as estruturas. Os resultados foram considerados bem representativos, permitindo concluir que a região precisa de planos de monitoramento e gestão para combater a degradação das florestas naturais.

Os trabalhos destacados, além dos implementados por Clark et al. (2010), Hansen et al. (2014), Jacobson et al. (2015), Redo, Aide e Clark (2012) e Saito et al. (2016), demonstram boa versatilidade metodologia. Nos referidos estudos, as classificações foram realizadas a partir de diferentes sensores orbitais, com resoluções radiométricas, espectrais, temporais e espaciais diferentes. Os objetivos dos estudos foram bem variados, assim como as condições físico-naturais das áreas mapeadas.

### 3.1.1 Classificadores de imagens orbitais

A classificação de imagens multiespectrais pode ser realizada a partir de diferentes métodos, dentre os quais, destacam-se o supervisionado e não supervisionado. Cada um dos métodos comporta o uso de diferentes algoritmos. No que concerne ao supervisionado, podem ser empregados algoritmos como *Artificial Neural Network*, *Maximum Likelihood*, *Minimum Distance*, *Parallelepiped*, *Mahalanobis Distance*, *K-Nearest Neighbor*, *Decision Tree* e *Image*

*Segmentation, Semantic Based*. Quanto aos classificadores não supervisionados, destacam-se o *ISO Data, Support Vector Machine, K-Means* (ABBURU; GOLLA, 2015).

Dentre os citados, o algoritmo *Maximum Likelihood* (ML) é um dos classificadores bem conhecidos e largamente aplicados em classificações supervisionadas (GONZÁLEZ-DUGO et al., 2013; MYINT et al., 2011; OTUKEI; BLASCHKE, 2010), sendo encontrado com facilidade em vários *softwares* de geoprocessamento (WENG, 2012). Baseado no teorema de Bayes, o ML é um método paramétrico que permite calcular a média das variâncias e covariâncias das assinaturas espectrais das classes previamente definidas. Desse modo, a classificação do objeto selecionado é baseada na máxima probabilidade do mesmo pertencer a um determinado grupo com valor espectral semelhante e localizado em uma determinada área (CHAGAS et al., 2009; OTUKEI; BLASCHKE, 2010).

As primeiras aplicações do algoritmo ML para classificação de imagens orbitais se tornaram possíveis durante a década de 70, muito em função do sucesso do programa espacial para monitoramento da superfície da *Aeronautics and Space Administration* - NASA (LOVELAND; DWYER, 2012; ROY et al., 2014). A maior disponibilidade de um conjunto de imagens orbitais foi fundamental para o desenvolvimento de pesquisas como as conduzidas por Schell (1972) e Reeves et al. (1975), cuja finalidade básica foi determinar a estrutura do uso do solo, cobertura da terra e inventário de terras com cultivos naturais para a Europa (STRAHLER, 1980).

Aos poucos, muitos outros estudos passaram a ser desenvolvidos. Um dos que merece destaque pela magnitude do trabalho foi realizado por Macalister e Mahaxay (2009), nas zonas úmidas da porção baixa do rio Menkong, localizado no sudeste asiático. Os autores empregaram o algoritmo ML para classificar uma série de imagens do satélite Landsat 7, sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM), para áreas consideradas estratégicas na bacia. Os resultados obtidos foram cruzados com informações levantadas em campo, onde os autores destacam que o nível de precisão do mapeamento variou de 77 a 94%.

No continente africano, aponta-se a aplicação realizada por Shalaby e Tateishi (2007) para a zona costeira do noroeste do Egito. O ML foi usado para classificar duas imagens multiespectrais para os anos de 1987 e 2001, geradas pelo sensor *Thematic Mapper* (TM), acoplado ao satélite Landsat 5. Dispondo de um total de 200 pontos, dos quais 150 foram amostrados em campo e os outros 50 a partir de um mapeamento topográfico da região, os pesquisadores puderam avaliar a acurácia do mapeamento. Para o ano de 1987, o nível de precisão foi de 91%, enquanto para o ano de 2001 o acerto foi de 92,3%.

No Brasil, Chagas et al. (2009) compararam a eficiência do classificador ML com o método de classificação *Java Neural Network Simulator* (JNNS), para representação do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Ribeirão São Bartolomeu. Os autores aplicaram o índice de Kappa para avaliação dos métodos, onde os resultados demonstraram que não houve diferença estatisticamente significativa. O JNNS apresentou índice de 0,80, enquanto o valor do ML foi de 0,79.

### 3.2 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica é um procedimento crucial para monitoramento e gerenciamento de bacias hidrográficas (TUCCI, 2005). De acordo com Galvêncio (2005), um modelo para fins de análises hidrológicas pode ser compreendido como “uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre”.

Obedecendo a classificação proposta por SINGH (1955), Christofolletti (2004) sintetiza que os modelos hidrológicos podem ser classificados como genéricos e distribuídos. Os genéricos, assumem que as variáveis e parâmetros oscilam apenas temporalmente na modelagem dos sistemas, enquanto os considerados distribuídos possuem base física que permite considerar não só as variações temporais, mas também as espaciais.

A tentativa de representar os fluxos hidrológicos dentro dos sistemas ambientais remete a períodos distantes. Porém, esta tendência passou a ganhar força no início dos anos 30, com as experiências dirigidas pelo hidrólogo Horton, cujos resultados mais expressivos só vieram a ser constatados em 1945. Neste ano, o pesquisador conseguiu simular o escoamento superficial em vertentes de bacias hidrográficas, experimento que veio a subsidiar outras pesquisas na área de modelagem hidrológica (BEVEN, 2004; BRUNET; FERRAS, 1998; CHRISTOFOLETTI, 2004).

Das experiências Hotonianas à própria inserção de computadores com maior capacidade de processamento durante da década de 50, período que figura como um marco divisor na história da modelagem hidrológica, muita coisa mudou. As gradativas alterações na estruturação teórico-metodológica dos modelos contribuíram para a concepção de numerosos simuladores, entre os quais ressalta-se o *Streamflow Simulation and Reservoir Regulation* (SSARR), *Topography Model* (TOPMODEL), *Kinematic Erosion* (KINEROS) e *Cascade Two-Dimensions* (CASC2D). Por outro lado, Koirala e Gentry (2012) pontuam que, apesar do comprovado avanço no campo da modelagem hidrológica, muitos modelos têm apresentado

limitações técnicas para simular os efeitos das mudanças ambientais e climáticas sobre os processos hidrológicos.

Dentre as novas tecnologias desenvolvidas para contornar o problema exposto pelos autores, um modelo em especial, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), vem ganhando notoriedade no meio científico. O SWAT é uma ferramenta de avaliação de água e solo desenvolvida pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) dos Estados Unidos. O objetivo principal com esse projeto foi construir um modelo capaz quantificar os processos físicos em bacias hidrográficas, permitindo avaliar os reflexos das ações associadas a dinâmica de uso e cobertura da terra sobre o escoamento superficial e sub-superficial, produção de sedimentos e qualidade da água (NEITSCH et al., 2009).

O SWAT tem se destacado devido a sua capacidade de simular os processos físicos de forma distribuída no tempo e espaço. Sua estrutura funcional permite boa integração com interfaces gráficas, a exemplo dos SIGs ArcGis e QGIS. Dentro desses ambientes, o usuário passa a inserir as informações referentes a mapas georreferenciados de uso da terra, solos, declividade, assim como dados climáticos (precipitação, temperatura, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar), esses, em escala diária. Além disso, podem ser acoplados ao SWAT dados gerados por modelos climáticos, a nível global e regional.

Quanto ao seu funcionamento, para fins de modelagem e espacialização dos resultados, o SWAT subdivide a bacia hidrográfica modelada em sub-bacias e microbacias. O principal benefício diz respeito a possibilidade de modelar áreas com diferentes características físico-naturais. Quanto a calibração, procedimento fundamental para avaliação da confiabilidade das simulações de modelos hidrológicos, o SWAT mostra grande versatilidade, admitindo um ajuste completo. Isto porque o mesmo pode ser calibrado com dados observados de vazão, produção de sedimentos, qualidade da água, umidade do solo e evapotranspiração, seja a nível de microbacia e sub-bacia (parametrização distribuída) ou de bacia hidrográfica (ARNOLD et al., 2012).

As vantagens oferecidas pelo SWAT vêm tornando seu uso cada vez mais difundido. As aplicações vão desde simples estudos de caso, ao desenvolvimento de pesquisas voltadas para o monitoramento e gestão dos recursos hídricos. Três grandes estudos merecem destaque quanto a dimensão de aplicabilidade do modelo. O primeiro ocorreu dentro o projeto *Hydrologic Unit Model of the U.S* (HUMUS), nos Estados Unidos. O modelo foi utilizado para simular os impactos do uso de poluentes agrícolas sobre a disponibilidade hídrica. Este projeto resultou em um extenso banco de dados representativos de todo território americano, que vem

sendo alimentado todos os anos e pode ser acessado livremente (ARNOLD et al., 1999; HUMUS, 2016).

O segundo projeto de grande escala geográfica realizado com o SWAT foi conduzido por Schuol et al. (2008) para o continente africano, onde foram delimitadas quatro grandes bacias. Os resultados, mesmo considerados bons pelos autores, demonstraram grandes incertezas quanto a algumas previsões. De todo modo, a pesquisa foi considerada estratégica, e auxiliou o desenvolvimento de outros trabalhos e planos de gestão dos recursos hídricos. Um bom exemplo do exposto foi o trabalho dirigido por Faramarzi et al. (2013), que lançaram mão das informações geradas para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água doce no continente. Os resultados evidenciados são variados, indicando ganhos e perdas hídricas, a depender da região.

Quanto ao terceiro estudo, este foi desenvolvido por Abbaspour et al. (2015) para o continente europeu. Entre os objetivos que nortearam pesquisa, ressalta-se a avaliação da variação espaço-temporal da disponibilidade hídrica para o continente, assim como a produção informações para o rendimento de práticas agrícolas. Os resultados foram considerados satisfatórios, porém os autores pontuaram que a extensão do estudo e o grande número de variáveis contribuíram para o aumento das incertezas nas simulações. De todo modo, os dados forneceram um panorama sobre a disponibilidade de água no tempo e espaço para o continente, demonstrando que os resultados, quanto a esse aspecto, podem ser melhor analisados em escala de sub-bacia.

Outras aplicações de menor dimensão espacial podem ser encontradas na vasta literatura que trata sobre questões hidrológicas e o uso do SWAT. Dentro destes trabalhos, nota-se que a calibração do modelo ainda é um grande desafio para vários pesquisadores. Nesse sentido, diferentes métodos de calibração têm sido aplicados para aferir o nível de ajuste às condições do ambiente modelado (BEKELE; NICKLOW, 2007; KANNAN; SANTHI; ARNOLD, 2008; SAKAGUCHI et al., 2014; YANG et al., 2007), porém, um dos que vem se destacando é o *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2). O SUFI-2 é um algoritmo que recentemente foi inserido na plataforma do SWAT-CUP para auxiliar os usuários na calibração do SWAT. O mesmo é capaz de analisar todas as fontes de incerteza referentes a gama de parâmetros, a exemplo da incerteza nas variáveis governadoras, estruturara conceitual do modelo e dados de entrada (MELLO et al., 2016).

Uma investigação comparativa conduzida por Yang et al. (2008) para a bacia Chaohe, na china, mostrou que, em relação a métodos como *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), *Parameter Solution* (PARASOL), *Markov chain Monte Carlo* (MCMC) e

*Importance sampling* (IS), o SUFI-2 também foi considerado bastante eficiente. Uma das principais vantagens em relação a todos os métodos analisados é sua capacidade de realizar menos simulações para atingir resultados satisfatórios, sobretudo quando esses são aferidos pelo coeficiente de Nash-Sutcliff e  $R^2$ .

A eficiência do SUFI-2 na calibração do SWAT pode ser comprovada em numerosos estudos publicados internacionalmente. No Irã, Akhavan et al. (2010) aplicaram o SWAT para modelar a quantidade e dinâmica da lixiviação em diferentes práticas agrícolas, na bacia hidrográfica do rio Hamadan-Bahar. Para calibração e análise de incerteza os autores empregaram o algoritmo SUFI-2. Os resultados demonstraram grande nível de incerteza, o qual os autores associaram às mudanças no uso da terra durante o período de estudo. O nível de ajuste do modelo, indicado pelo coeficiente de Nash-Sutcliff e  $R^2$ , foi de 0,77 e 0,83, respectivamente. Estes valores foram considerados bastante satisfatórios pelos autores.

Na China, Zhao et al. (2015) empregaram o SWAT para avaliar os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra e variabilidades climáticas sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Weihe. A calibração do modelo foi conduzida com base no SUFI-2. Os autores utilizaram dados de duas estações fluviais para medir o nível de ajuste do modelo através do coeficiente de Nash-Sutcliffe e  $R^2$ . O nível de acerto para a primeira (Huaxian), foi de 0,64 para o Nash e 0,68 para o  $R^2$ , enquanto segunda (Xianyang) apresentou coeficientes de 0,67 e 0,68, respectivamente. Os resultados indicaram que as variabilidades climáticas produzem efeitos generalizados na bacia, enquanto as mudanças no uso afetam principalmente a nível de sub-bacia.

Para a América Central, destaca-se o estudo conduzido por Setegn et al. (2014) na bacia hidrográfica do rio Cobre, Jamaica. Os autores objetivaram avaliar a variação temporal da vazão na referida bacia. Na etapa de calibração do modelo, os resultados encontrados pelos autores para o coeficiente de NS variaram de 0,51 a 0,58, enquanto o  $R^2$  oscilou entre 0,59 e 0,69. Os pesquisadores pontuaram que os erros associados a distribuição espacial da precipitação pluvial impediram um melhor ajuste do modelo.

No Brasil, a aplicação do modelo SWAT ainda se dá de forma tímida, muito em função da escassez de dados. Porém, um dos estudos de grande relevância no país foi conduzido por Fernandes (2015) para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, região considerada socioeconomicamente estratégica. O pesquisador calibrou o modelo para estimar da vazão e produção de sedimentos na região. Os resultados demonstraram que o SWAT conseguiu representar bem os fluxos hidrológicos, com coeficiente de NS variando entre 0,66 a 0,99, enquanto o  $R^2$  oscilou em um intervalo de 0.64 a 0.99.

### 3.3 Mudanças climáticas

Segundo nota técnica nº 79 da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1966), enquadram-se como mudanças climáticas as alterações persistentes, estatisticamente verificadas, nos padrões climáticos de uma determinada região. Geralmente, essas modificações são aferidas a partir de análise de tendência sobre variáveis meteorológicas como precipitação e temperatura do ar.

As mudanças de clima são eventos que sempre fizeram parte do longo processo de evolução da Terra. Estudos paleoclimáticos indicam que o planeta passou por períodos de grande alternância na temperatura, atravessando Eras geológicas de resfriamento e aquecimento. Algumas das causas principais referem-se à erupção de vulcões, movimento das placas tectônicas, variação da radiação solar, posicionamento da Terra em relação ao Sol e choque com corpos celestes (CROWLEY; NORTH, 1988; OLIVEIRA et al., 2015).

Nas últimas décadas, uma corrente de pesquisadores vem investigando a possibilidade de uma possível interferência humana na dinâmica climática global. Esta interferência estaria associada ao incremento nas atividades industriais, uma das principais responsáveis pelo aumento concentração de gases como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Ressalta-se que efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre no planeta Terra, no qual a energia de ondas curtas emitida pelo sol, atinge a atmosfera, onde parte é refletida de volta ao espaço sideral, enquanto o restante (45%) é absorvido pelas superfícies líquidas e sólidas do planeta. Posteriormente, uma fração energia absorvida é liberada em forma de radiação de ondas longas. A radiação emitida é então absorvida por gases e vapor d'água e reemitida à superfície, mantendo o controle da temperatura global, a qual, sem o referido mecanismo, seria em torno de  $-7^\circ\text{C}$ , cerca  $30^\circ\text{C}$  a menos do que é observado na atualidade (MOLION, 2008).

Investigações iniciais sobre a referida temática têm reforçado as suspeitas sobre a participação humana na alteração do balanço de energia global. De acordo com Ayoade (2003), desde que se iniciaram os registros climáticos para algumas regiões do globo terrestre, foi detectada uma tendência de aquecimento entre 1880 e 1940. Logo em seguida, verificou-se um período de resfriamento, o qual foi interrompido e invertido, a partir da década de 60.

Para Joly (2007), um dos agravantes relacionados às mudanças climáticas antropogênicas diz respeito a velocidade do processo. No passado geológico da Terra as alterações climáticas se deram gradativamente, dando tempo para muitas espécies animais e vegetais pudessem adaptar-se às novas configurações climáticas durante centenas de gerações.

Porém, no que diz respeito ao aquecimento global antropogênico, mudanças mais significativas são esperadas para a segunda metade do século XXI. Ainda assim, a natureza dos efeitos biofísicos e a capacidade de resposta a eles ainda são incertas, representando grande desafio para os pesquisadores.

Com o objetivo de apoiar trabalhos científicos para avaliação do clima, foi criado em 1988, pela OMM e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). O grupo foi incumbido de reunir uma gama de informações técnicas, socioeconômicas e científicas para compreensão dos riscos que as alterações climáticas podem oferecer a humanidade. Os resultados das pesquisas passaram a ser publicados no formato de relatórios a partir de 1990 (IPCC, 2007; 2013).

No ano 2000, o IPCC passou a inserir em seus relatórios novos cenários climáticos baseados no desenvolvimento humano. Estes refletiam as projeções futuras do clima com base em forçantes controladoras como níveis de emissão de gases estufa, mudanças na tecnologia, crescimento populacional, desenvolvimento socioeconômico, assim como a complexa interação entre essas variáveis. Ao todo, são considerados quatro cenários base: A1, A2, B1 e B2. Os dois primeiros representam um futuro onde não se verifica comprometimento com as causas ambientais, as tecnologias mudam rapidamente e fontes de energia não renováveis são largamente utilizadas. Quanto aos cenários B1 e B2, estes representam um mundo onde se busca a sustentabilidade. Nesses cenários valoriza-se o desenvolvimento de novas fontes de energia limpa em detrimento das matrizes energéticas não renováveis.

### 3.3.1 Modelos climáticos

O conhecimento sobre as mudanças na dinâmica de circulação atmosférica, temperatura do ar e precipitação para cenários climáticos futuros, é produzido mediante a utilização de modelos matemáticos. A partir da representação tridimensional dos sistemas atmosféricos, os modelos climáticos são capazes de simular os principais processos relacionados ao balanço de energia global, considerando as inter-relações entre as componentes do sistema, assim como os mecanismos de retroalimentação dos processos físicos (GEOFFROY et al., 2013).

Os relatórios publicados pelo IPCC nas últimas décadas trazem uma série de resultados gerados a partir da aplicação de um conjunto de modelos acoplados Oceano-Atmosfera, conhecidos como modelos globais. Dentre eles, pode-se destacar o *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* (HadCM3), desenvolvido no centro de pesquisas na Inglaterra, o modelo australiano *Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research*

*Organization* (CSIRO-Mk2), o *Canadian Center for Climate Modeling and Analysis* (CCCMA), produzido no Canadá, o *National Oceanic and Atmospheric Administration* NOAA-*Geophysical Fluids Dynamic* (GFDL-CM2), dos Estados Unidos, e o *Center for Climate Studies and Research* CCSR/*National Institute for Environmental Studies* (CCSR/NIES), do instituto de pesquisas do Japão.

No Brasil, a aplicação destes modelos tem sido ampliada devido aos riscos ambientais relacionados as possíveis mudanças no clima. As características técnicas e estrutura conceitual varia de modelo para modelo, fazendo com que muitas vezes as investigações sobre o clima sejam realizadas por meio da aplicação de vários simuladores para uma mesma região. Este procedimento tem produzido resultados bastante distintos, muitas vezes com projeções contrárias em relação ao comportamento de variáveis como precipitação e temperatura.

Um dos estudos de notoriedade foi conduzido por Marengo (2006) para todo o território brasileiro. Entre os modelos testados, destaca-se o GFDL, CCCMA e MIROC. Em relação aos resultados obtidos para o Nordeste, uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas, esses foram variados. No que se refere aos modelos GFDL e CCCMA, os cenários projetados indicam incremento da precipitação pluviométrica, contrariando vários estudos baseados nos relatórios do IPCC. Quanto ao MIROC, este projetou redução sistemática da precipitação pluvial para a região.

Por outro lado, a forma como as variáveis são modeladas e dinamizadas pelos simuladores são determinantes para a configuração de quadros tão diversos. Uma rápida comparação entre os três modelos aplicados por Marengo (2006) para o Brasil reforçam esta afirmativa. O modelo GFDL, por exemplo, possui resolução de  $2,5^\circ \times 2^\circ$  para componente atmosférica, com 24 níveis verticais. Quanto a componente oceânica, verifica-se  $1^\circ \times 1^\circ$ , porém esta aumenta quando ultrapassados  $30^\circ$  de latitude Norte.

Quanto ao CCCMA, o mesmo conta com uma resolução oceânica de  $1,8^\circ \times 1,8^\circ$  e 29 níveis verticais e resolução espacial de  $1,9^\circ \times 1,9^\circ$ . Em relação ao MIROC, este possui melhor detalhamento entre os apresentados, com resolução de  $0,5^\circ - 1,4^\circ \times 1,4^\circ$  e 47 níveis verticais para componente oceânico. Outro ponto diferencial no MIROC é a inclusão dos efeitos dos gases estufa, assim como a variação da radiação solar, considerada constante no GFDL e CCCMA (JIANG et al., 2012).

### 3.3.2 Mudanças climáticas e os recursos hídricos

Para pesquisadores como Ma et al. (2008), não há mais dúvidas de que a variação na vazão de várias bacias hidrográficas tem relação com as mudanças climáticas e intervenções humanas no uso e cobertura da terra. No que concerne aos eventos climáticos, as modificações no elemento precipitação pluvial são apontadas como responsáveis pelos desastres associados à sua escassez, em áreas onde a oferta hídrica é inferior a demanda, ou excesso.

Por essa razão, a dinâmica de precipitação pluviométrica vem sendo alvo de investigações em várias partes do mundo em função da sua importância para a distribuição espaço temporal da água. Os resultados encontrados revelam condições diversas. Para o Oriente Médio (TABARI; TALAEE, 2011), maior parte do continente africano (BATES, 2008), parte dos Estados Unidos e continente europeu (GALLANT; KAROLY; GLEASON, 2014), observa-se, de modo geral, tendência de redução dos valores de precipitação pluvial. Quanto a América do Sul, o padrão detectado por Skansi et al. (2013) indica aumento da condição de umidade para a porção sudeste da região. Por outro lado, para parte ocidental do continente e região Nordeste do Brasil, o padrão encontrado foi contrário, porém sem significância estatística para os testes empregados nas séries históricas.

As projeções baseadas em cenários climáticos do IPCC seguem dinâmica semelhante ao verificado na atualidade. Para o Brasil (Amazônia, bacia do Prata e Nordeste), os modelos do IPCC (CCCMA, CSIRO, HadCM3, CCSR/NIES e GFDL) empregados por Marengo (2006) revelam que as tendências da precipitação pluvial variam de acordo com a região. Dos cinco modelos utilizados, com iguais concentrações de gases estufa, para os anos de 2050 e 2100, cenários B2 e A2, apenas o GFDL mostrou tendência de incremento nas chuvas para a Amazônia, enquanto os demais revelaram um padrão contrário.

Para a bacia do Prata, os modelos identificam que o ciclo da precipitação pluvial é semelhante ao atual, por outro lado, discordam quanto ao volume anual. O HadCM3 mostra aumento das chuvas na estação chuvosa, na ordem de 1 mm por dia, e redução de 0,5 mm no período seco. O CSIRO e CCSR/NEIS foram os que mais destoram em relação aos demais, com estimativas de decréscimo anual da chuva simulada. O autor pontua que apesar dos resultados encontrados a partir das projeções, o que se tem verificado desde a década de 70 é o aumento do volume da vazão dos rios da região. Ainda assim, o mesmo admite que é difícil apontar a natureza do fenômeno, que pode ser o resultado de mudanças na cobertura da terra, assim como variações no regime pluvial.

Quanto a região Nordeste, todos os modelos mostram tendência de aumento da temperatura média do ar e redução da precipitação pluviométrica. Verificou-se no estudo que o ciclo anual das chuvas se assemelha ao padrão observado na atualidade. Porém, as estações secas tendem a se tornar mais alongadas, enquanto o período chuvoso é encurtado. A consequência do quadro exposto deve recair principalmente sobre a redução da vazão de vários rios localizados na região, contribuindo para a mudanças espaço-temporais da quantidade e qualidade da água.

### 3.3.3 Disponibilidade hídrica

O balanço entre disponibilidade e demanda hídrica é um dos instrumentos adotados por entidades como a ONU para o gerenciamento dos recursos hídricos, na tentativa de garantir às populações de várias regiões o pleno acesso à água. Diferentes metodologias são empregadas para a estruturação de diferentes índices de disponibilidade hídrica, desde o mais simples às que exigem maior número de informações.

Algumas aplicações para avaliação da disponibilidade hídrica são baseadas no Índice de Exploração da Água (IEA), utilizado pela *European Environment Agency*. A quantificação é realizada por meio da razão entre a vazão de retirada para usos consuntivos e a vazão média anual. Para este índice, os intervalos percentuais iguais ou inferiores a 5% indicam um estado de excelência, onde pouca ou nenhuma atividade de gerenciamento se faz necessária, sendo a água um recurso amplamente disponível. Em situações onde a razão de retirada é igual ou superior a 40%, o quadro é considerado crítico e exige atividades de gerenciamento, assim como grandes investimentos em infraestrutura (ALCAMO; HENRICHS; RÖSCH, 2000).

Alguns índices como o *Social Water Scarcity Index*, proposto por Ohlsson (2000), levam em consideração indicadores sociais nas estimativas da disponibilidade hídrica. A grande vantagem de sua aplicação diz respeito a possibilidade de traçar um panorama referente ao modo como as populações podem ser afetadas sob situações de limitação hídrica. Para isto, leva-se em consideração o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), o qual auxilia o investigador na avaliação condição social das populações possivelmente afetadas, assim como a capacidade de reagir às condições ambientais adversas.

Entre os índices mais simples, porém bem utilizados, está o de Falkenmark (1989). A contabilização da disponibilidade hídrica *per capita* para esta estimativa é feita a partir do quociente entre a vazão média anual e o número total de habitantes de uma determinada bacia hidrográfica. Desse modo, valores de disponibilidade  $< 500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$  refletem um quadro de

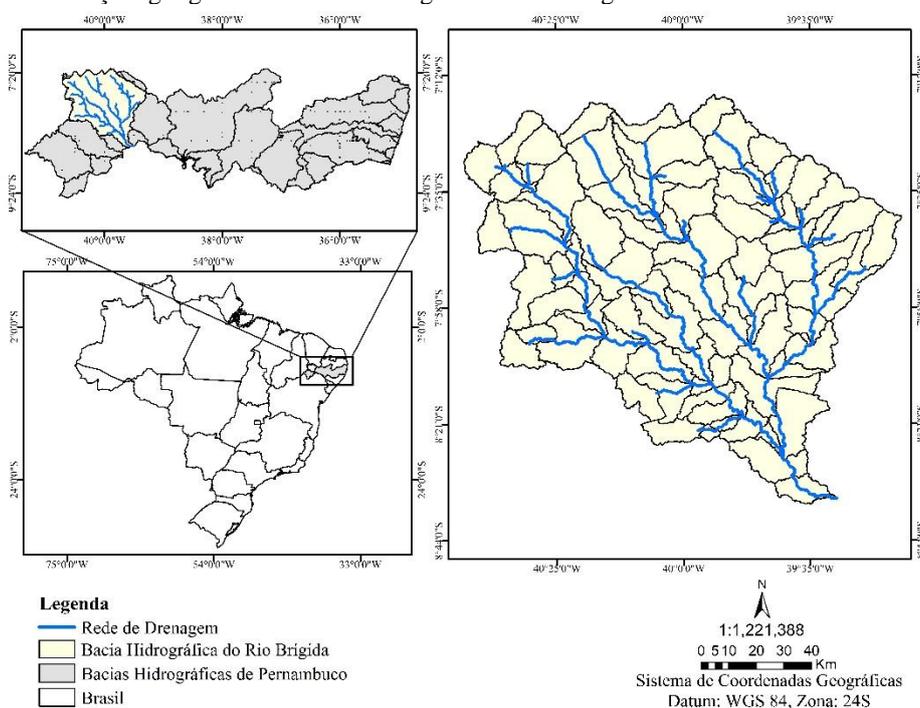
escassez. Quando varia entre 500 e 1700 m<sup>3</sup>/hab/ano a situação é de estresse. Volume *per capto* superior a 1700 m<sup>3</sup>/hab/ano indica situação de conforto.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização e caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Brígida corresponde à Unidade de Planejamento Hídrico UP11, localizada no extremo oeste da mesorregião do Sertão Pernambucano ( $07^{\circ} 19' 02''$  e  $08^{\circ} 36' 32''$  de latitude sul, e  $39^{\circ} 17' 33''$  e  $40^{\circ} 43' 06''$  de longitude oeste), limitada ao norte pelo estado do Ceará e a oeste pelo estado do Piauí (Figura 1).

Figura 1 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A referida unidade possui área de 13.495,73 km<sup>2</sup>, abrangendo 15 municípios, com uma população total de 429,685 habitantes, segundo dados do (IBGE, 2010). Do total de municípios, nove encontram-se totalmente inseridos na bacia do rio Brígida (Araripina, Bodocó, Exu, Granito, Ipubi, Moreilândia, Ouricuri, Trindade e Parnamirim), enquanto os restantes estão parcialmente inseridos (Cabrobó, Orocó, Santa Cruz, Santa Filomena, Santa Maria da Boa Vista e Serrita). São municípios que, de modo geral, têm suas bases econômicas atreladas ao setor agropastoril e indústria gesseira, com destaque para o polo gesso de Araripina (APAC, 2016; LOPES et al., 2010).

#### 4.1.1 Tipologia Climática

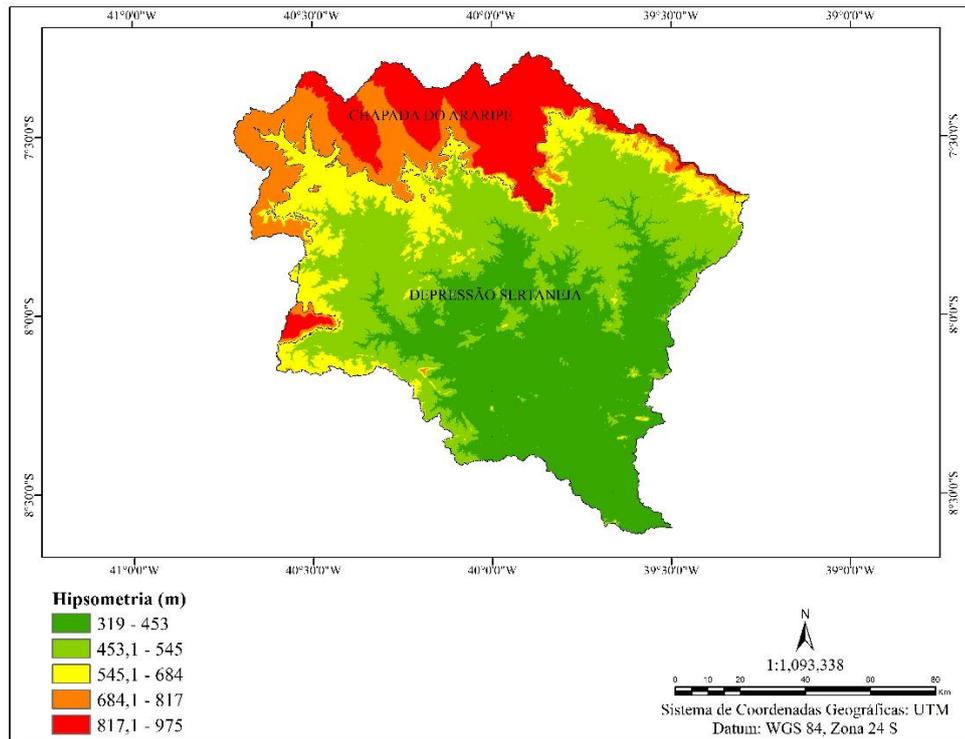
Devido a influência da topografia, a bacia hidrográfica do rio Brígida apresenta duas tipologias climáticas. À montante da bacia, onde está localizada a unidade geoambiental da chapada do Araripe, o clima é classificado como subúmido seco. No centro e à jusante, porção assentada sobre a depressão sertaneja, o clima é o tropical semiárido, sendo esta tipologia climática predominante na bacia (SAMPAIO, 1995; BELTRÃO; LAMOUR, 1985)

Quanto à precipitação pluviométrica, essa variável é influenciada, principalmente, pela atuação dos sistemas meteorológicos atuantes na região: instabilidades associadas as Frentes Frias, Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZACAS) e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O início da pré-estação chuvosa ocorre em dezembro (extremo oeste) e está associado às instabilidades das Frentes Frias e aos VCAS, que atua principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. A partir de fevereiro ou março, dependendo do ano, a ZCIT começa a atuar em todo o Sertão, que já se encontra em seu principal período chuvoso (ASSIS; SOUZA; SOBRAL, 2015).

#### 4.1.2 Hipsometria e pedologia da bacia

A Figura 2 representa a distribuição espacial altitude na bacia hidrográfica do rio Brígida. A unidade ambiental encontra-se assentada sobre as unidades geomorfológicas Depressão Sertaneja e Chapada do Araripe. A primeira é predominante na bacia, onde são encontrados valores altimétricos variantes entre 319 e 545 m, caracterizada por um relevo plano e suavemente ondulado. Quanto a região do topo plano e encostas da Chapada do Araripe, as altitudes variam entre 545,1 e 975 m. No centro-oeste da bacia, observa-se uma mancha que corresponde aos maciços residuais oriundos do processo de formação do Planalto da Borborema, onde as altitudes são semelhantes às encontradas na região da Chapada.

Figura 2 - Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Brígida



Fonte: Elaborado pelo autor.

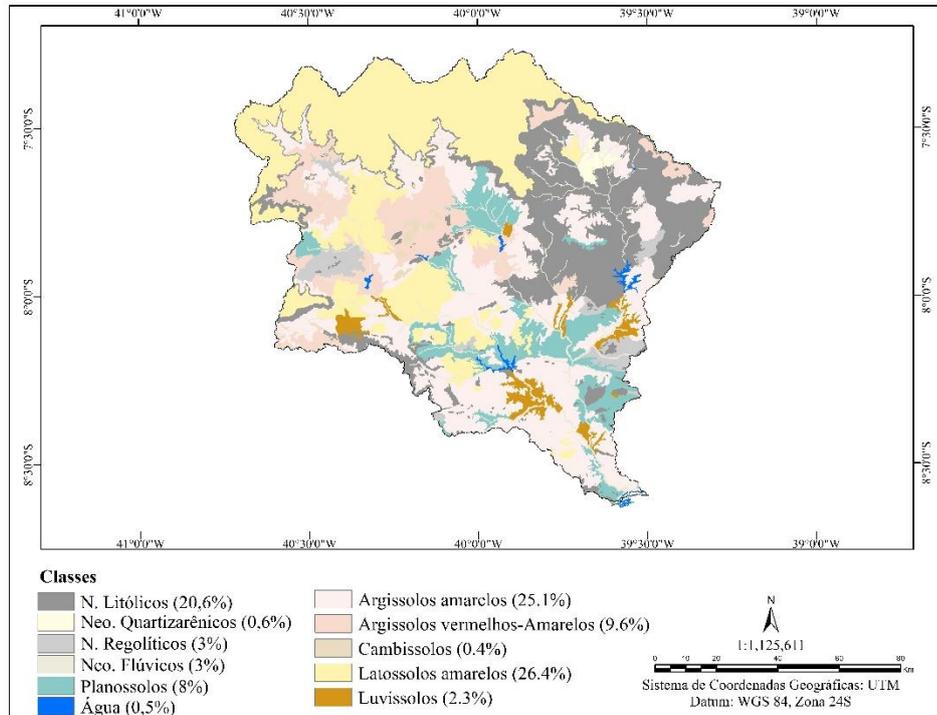
Quanto aos solos encontrados na área de estudo, estas são representadas na Figura 3. Ao todo são identificadas dez classes de solos, entre as quais observa-se o predomínio do Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos e Neossolos Litólicos, que juntos ocupam 72,1% de toda a área. A primeira categoria está concentrada na porção mais ao norte da bacia, próximo as áreas de encosta. São solos que podem variar de mediamente profundos a profundos, bem drenados, variando de porosos a muito porosos, com textura de média a muito argilosa. Dados coletados por EMBRAPA (2016) para a bacia do Brígida indicam que sua profundidade pode chegar a 2,2 m.

A segunda maior classe, Argissolos Amarelos, é encontrada em praticamente toda área de estudo, com exceção das áreas à montante da bacia. A referida classe de solo varia de mediamente profundo a profundo, de moderadamente drenado a bem drenado, com grande concentração de argila no horizonte B textural. As coletas realizadas pela EMBRAPA na bacia, revelam que os mesmos alcançam profundidade máxima de 1,7 m em determinadas localidades. Em áreas onde são menos profundos, verifica-se a presença de pedregosidade e textura arenosa.

Quanto aos Neossolos Litólicos, estes concentram-se na porção nordeste da bacia, alcançando as áreas centrais e a montante. São frequentemente encontrados em áreas acidentadas onde observam-se afloramentos rochosos, entre as unidades de relevo ondulados e montanhosos. Entre sus principais características estão a pouca profundidade, principalmente

em áreas semiáridas, horizonte A diretamente sobre a rocha ou C de pequena espessura. Na bacia do rio Brígida alcançam no máximo 25 cm de profundidade, sendo bastante pedregosos e com horizonte superficial arenoso.

Figura 3 - Distribuição espacial dos tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir da base de dados vetoriais do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE).

## 4.2 Procedimentos metodológicos

### 4.2.1 Mapeamento do uso e cobertura da terra

Para mapear a estrutura do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida foram utilizadas imagens orbitais do sensor *Operational Land Imager* (OLI), acoplado ao satélite Landsat 8, obtidas junto a U.S. *Geological Survey* (USGS). O produto possui resolução espacial, para as bandas multiespectrais, de 30 m e resolução radiométrica de 16 bits. Para que toda a superfície da bacia do rio fosse totalmente representada, foram utilizadas duas cenas. A primeira corresponde órbita 217, zona 65, enquanto a segunda é referente a mesma órbita, porém na zona 66. O imageamento é relativo ao período de passagem do satélite na área, em 14 de dezembro de 2015, período considerado ideal devido à ausência de nuvens.

Após aquisição das imagens, realizou-se o empilhamento das bandas e posterior união das cenas. Subsequentemente, calculou-se reflectância, processo realizado pelo programa Erdas 9.1, licenciado junto ao laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO). A descrição da equação empregada para a estimativa da reflectância pode ser visualizada a seguir:

$$r_b = \frac{(Add_{ref,b} + Mult_{ref,b} ND_b)}{\cos Z d_r} \quad (1)$$

Em que:  $Add_{ref,b}$  e  $Mult_{ref,b}$  representam os termos aditivos e multiplicativos do coeficiente de reflectância de cada banda, disponíveis no metadados de cada imagem;  $ND_b$  indica a intensidade de cada pixel e banda;  $b$  é o índice representativo das bandas do OLI;  $Z$  é o ângulo zenital do Sol e o  $d_r$  corresponde à correção da excentricidade da órbita terrestre, estimada por:

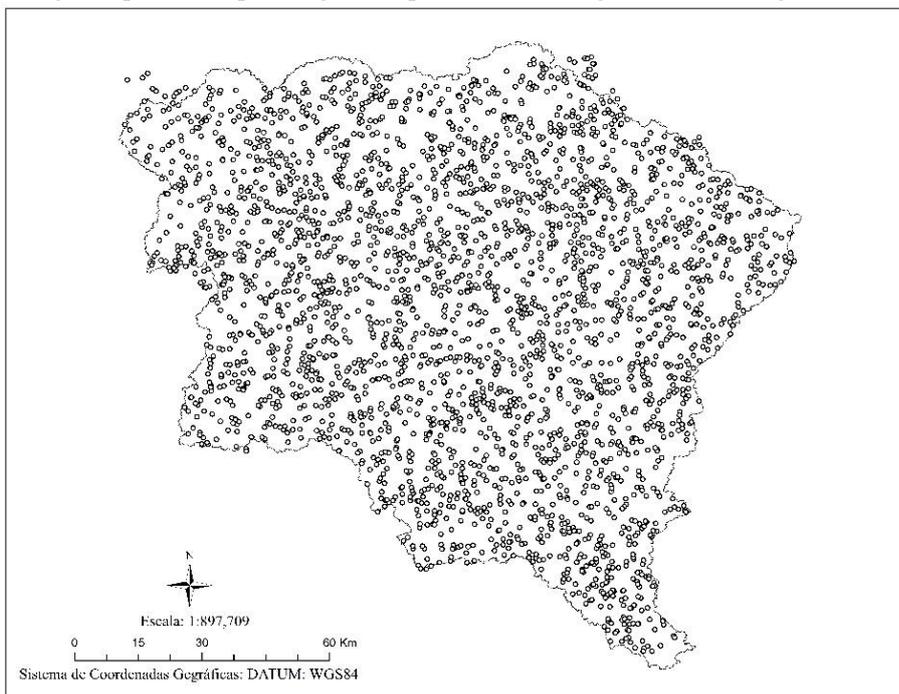
$$d_r \left( \frac{1}{d_{TR}} \right)^2 \quad (2)$$

#### 4.2.2 Classificação guiada com auxílio de imagens do Google Earth

Após etapa de processamento da imagem para cálculo da reflectância, partiu-se para a classificação da mesma. Para guiar o processo de classificação, optou-se por analisar o conjunto de imagens de alta resolução espacial disponíveis no banco de dados do Google Earth Pro (GEP). Esse método permitiu identificar as classes presentes na área de estudo, assim como suas distribuições no espaço. Maiores detalhes sobre esse procedimento podem ser encontrados no trabalho de Fritz et al. (2009).

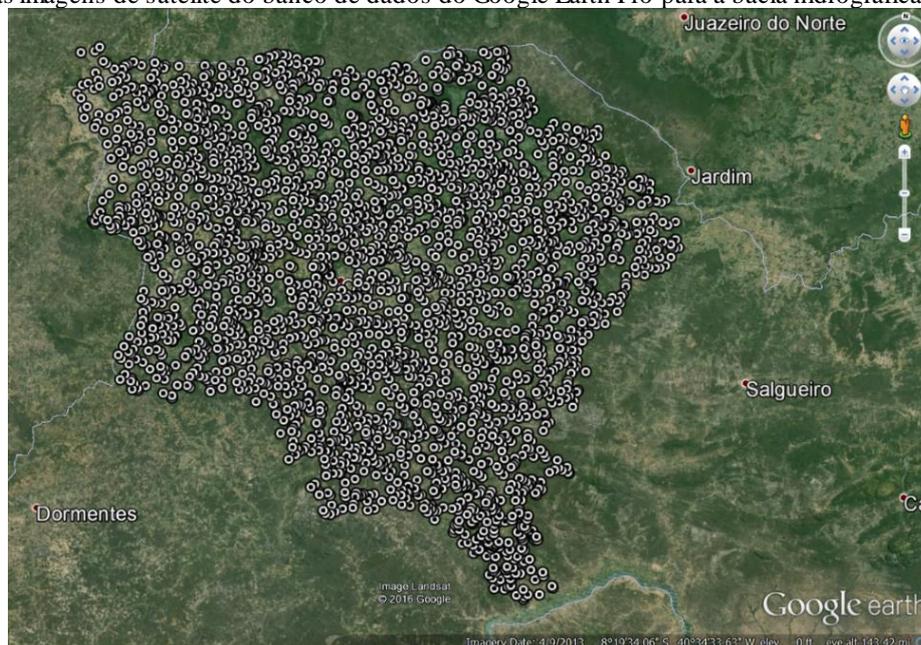
Para realizar a amostragem, foi criada uma nuvem de pontos, no formato *Shapefile* (Figura 4), com o auxílio do software ArcGis. Ao todo foram gerados, aleatoriamente, 3 mil pontos, com distanciamento médio de 120 metros, bem distribuídos ao longo da área de estudo. A quantidade de pontos foi definida a partir de testes de espacialização, onde buscou-se também arrecadar um grande número de informações para aumentar a precisão do produto. O passo seguinte consistiu na importação da *shape* de pontos para dentro do *software* GEP, conforme pode ser observado na Figura 5. Deste modo, cada ponto passou a sobrepôr as classes de usos da terra presentes na área de estudo, localizando-as espacialmente.

Figura 4 - Distribuição espacial dos pontos gerados para a bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: Produzido pelo autor a partir da base de dados vetoriais do projeto Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE).

Figura 5 - Distribuição espacial dos pontos utilizados para classificação dos usos e coberturas observados por meio das imagens de satélite do banco de dados do Google Earth Pro para a bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: Produzido pelo autor a partir do banco de dados do Google Earth Pro.

Com auxílio da ferramenta *zoom* do GEP, cada um dos três mil pontos da *shape* foi ampliado de modo a permitir interpretação visual das características da superfície no local (Figura 6). À cada estrutura identificada foi atribuído um valor numérico correspondente a uma categoria de uso (1-caatinga, 2-agricultura de sequeiro, 3-agricultura irrigada e 4-floresta mista)

em sua posição na *shape* de pontos, para serem utilizados na etapa de classificação mais adiante. É importante frisar que algumas imagens disponibilizadas pelo Google Earth são temporalmente defasadas (mais de três anos de diferença para a imagem utilizada no presente estudo), ou foram geradas por satélites com baixa resolução espacial. Deste modo, dos três mil pontos criados, 300 foram descartados ao longo do processo por uma das razões citadas.

Figura 6 - Visualização ampliada de um dos 3 mil pontos dispostos na área de estudo.



Fonte: Produzido pelo autor a partir de imagens de satélites disponíveis no banco de dados do Google Earth Pro.

Em seguida, foram criadas as assinaturas espectrais das classes de uso e cobertura da terra a partir da imagem de reflectância processada, e a elas atribuiu-se os códigos representativos de cada estrutura identificada no banco de dados do GEP. Esse procedimento foi realizado por meio da ferramenta *Create Signature* do ArGis, onde foram adicionados os dados referentes a nuvem de pontos e a imagem do satélite Landsat 8.

#### 4.2.3 Algoritmo de classificação

Na etapa final, submeteu-se a imagem do Landsat 8 a classificação supervisionada por meio do algoritmo *Maximum Likelihood*. Para isso, utilizou-se a ferramenta de mesmo nome, disponível no ArcGis. Nesta etapa, foram inseridas na caixa de diálogo os dados correspondentes a assinatura espectral, agora codificada de acordo com os usos, e a imagem do Landsat 8, processada até a etapa da reflectância.

#### 4.2.4 Associação do uso da terra com o banco de dados americano

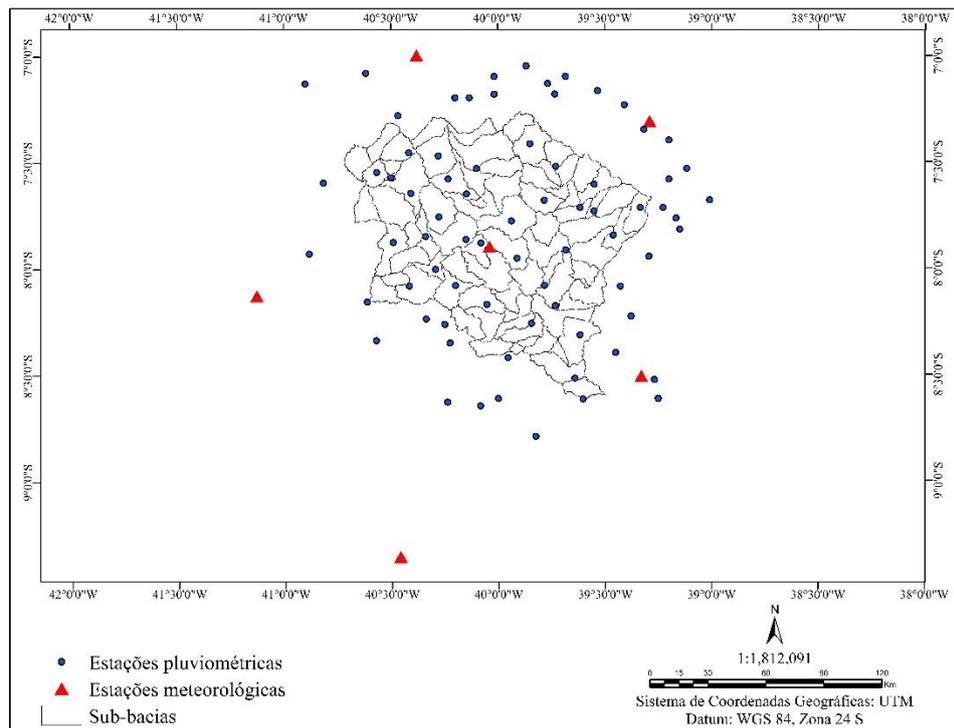
Como ainda não existem informações referentes a alguns parâmetros físicos para determinadas tipologias de vegetações encontradas no Brasil, pelo menos no formato exigido pelo SWAT, foi necessário realizar uma associação entre o uso e cobertura da terra encontrado na bacia do rio Brígida com as informações contidas no banco de dados do modelo. Vale ressaltar que esse método é muito comum em trabalhos com aplicação do SWAT fora dos Estados Unidos.

No banco de dados do modelo foram identificados alguns grupos vegetais inseridos em domínios morfoclimáticos semelhantes aos encontrados na bacia hidrográfica do rio Brígida. Desse modo, a vegetação de caatinga foi associada a tipologia *Range Brush* (RNGB), as áreas de sequeiro foram classificadas como *Pasture* (PAST), a Floresta Estacional Decidual foi associada a classe *Forest-Deciduous* (FRSD) e a agricultura irrigada foi atribuída ao uso *Orchard* (ORCD).

#### 4.3 Banco de dados climatológicos

A base de dados climatológicos foi adquirida junto Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), Agência Nacional de Água (ANA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ao todo, foram utilizadas séries temporais de 73 postos pluviométricos e seis estações meteorológicas com informações diárias (Figura 7). Os dados, de modo geral, correspondem ao período que se estende de 1963 a 2014. As variáveis empregadas foram precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade média do vento a 10 m e umidade relativa do ar, todos em escala temporal diária. Inicialmente os dados foram organizados e tratados, de modo a descartar os valores discrepantes, provavelmente relacionados a erro na coleta ou transmissão dos mesmos. Devido à forte variabilidade espaço-temporal das chuvas na região, optou-se por não realizar nenhum método de tratamento estatístico nas séries temporais utilizadas no presente estudo.

Figura 7 - Distribuição espacial das estações pluviométricas e meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse dos dados, realizou-se uma parametrização das variáveis meteorológicas para entrada no modelo hidrológico SWAT. Para isto, empregou-se a macro *Weather Generator* (WGN), disponível para *download* em formato Excel xls., no seguinte domínio: <http://swat.tamu.edu/>. Esse é um modelo projetado para calcular as estatísticas referentes às séries temporais das estações meteorológicas, sendo ainda capaz de preencher as falhas observadas para determinados períodos.

De acordo com Schuol e Abbaspour (2007), dentro da WGN as variáveis são simuladas utilizando diferentes métodos. A estimativa da temperatura do ar e radiação solar, por exemplo, é baseada em uma distribuição normal, corrigida com base no estado de probabilidade de um dia ser úmido ou seco. O fator de correção é utilizado para produzir variações na temperatura do ar e radiação solar quando há mudanças nas condições de tempo (dias secos ou úmidos).

Quanto ao modelo de precipitação empregado, o mesmo foi proposto por Nicks (1974) e é baseado na cadeia de primeira ordem de Markov. Deste modo, a entrada do modelo inclui probabilidades mensais da precipitação para determinar se um dia foi seco ou úmido, com base no anterior. O total pluviométrico é determinado por meio da geração de uma distribuição assimétrica normal da precipitação diária.

Para as variáveis velocidade do vento e umidade relativa do ar, a simulação é baseada na equação exponencial modificada em função da velocidade média mensal do vento. A

umidade relativa do ar é modelada com base na média diária mensal por meio de uma distribuição triangular. Semelhante ao método utilizado para a temperatura e radiação solar, os valores de umidade são ajustados conforme variações nas condições de tempo.

Para que a Macro WGN pudesse ler os dados de entrada, foram gerados arquivos no formato txt para cada uma das variáveis, com os dados organizados em coluna. As datas para os períodos sem eventos observados foram mantidas, porém foi inserido o valor “-99” no campo, reconhecido pelo SWAT como um dado a ser simulado. Após essa etapa, os dados são inseridos no WGN, que gera os parâmetros referentes aos registros dos dados meteorológicos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros gerados pelo WGN com base nos dados meteorológicos das estações utilizadas.

Parâmetros	Descrição	Unidade
TMPMX	Média da temperatura mínima diária no mês	°C
TMPMN	Média da temperatura máxima diária no mês	°C
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima diária no mês	°C
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima diária no mês	°C
PCPMM	Média da precipitação total mensal	mm
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação diária no mês	mm
PCPSKW	Coefficiente de assimetria da precipitação diária no mês	-
PR_W1	Probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido no mês	-
PR_W2	Probabilidade de um dia úmido seguir um dia seco no mês	-
PCPD	Número médio de dias de precipitação no mês	mm
RAINHHMX	Precipitação máxima na primeira 0,5 hora no período de registro no mês	mm
SOLARAV	Média da radiação solar diária no mês	MJ/m <sup>2</sup> /dia
DEWPT	Média da temperatura no ponto de orvalho no mês	°C
WNDV	Velocidade média diária do vento no mês	m/s

Fonte: Produzido pelo autor, com base no manual de inputs/outputs do Arnold et al. (2012).

A funcionalidade de cada um dos parâmetros e as equações utilizadas na estimativa dos mesmos, por meio do WGN, foram retiradas do manual do usuário de inputs/outputs (ARNOLD et al., 2012) e são descritas a seguir:

**TMPMX/TMPMN** - Médias das temperaturas máximas e mínimas no mês são baseadas na seguinte equação:

$$TMP_{MX}, TMP_{MN}(mon) = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mon}}{N} \quad (3)$$

Onde,  $T_{mon}$  corresponde a temperatura máxima ou mínima diária no mês e N representa o número total de eventos de temperatura máxima ou mínima diária para um determinado mês ( $mon$ ).

**TMPSTD<sub>MX</sub>( $mon$ )/TMPSTD<sub>MN</sub>( $mon$ )**. Desvio padrão das temperaturas máximas e mínimas diárias no mês:

$$TMPSTD_{MX}, TMPSTD_{MN} (mon) = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{MX} - TMP_{MX \text{ ou MN}})^2}{N-1}\right)} \quad (4)$$

Onde,  $TMPSTD_{MX}(mon)$  ou  $TMPSTD_{MN}(mon)$  indica a temperatura máxima ou mínima diária registrada no mês e N é o número total de eventos de temperatura máxima ou mínima diária para um determinado mês.

**PCPMM** - Precipitação média total mensal:

$$R_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N R_{day,mon}}{yrs} \quad (5)$$

Onde,  $R_{mon}$  é a precipitação média mensal,  $R_{day,mon}$  corresponde a precipitação diária para o registro d no mês, N é o número total de registros no mês, usado para calcular a média, e yrs são o número de anos de precipitação diária utilizados no cálculo.

**PCPSTD** - Este parâmetro quantifica a variabilidade na precipitação diária para cada mês, conforme a seguinte equação:

$$\sigma_{mon} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - R_{mon})^2}{N-1}\right)} \quad (6)$$

Onde, PCPSTD é o desvio padrão para precipitação diária no mês,  $R_{day,mon}$  é a quantidade de precipitação para o registro d no mês,  $R_{mon}$  é a precipitação média do mês e N é o número total de registros diários de precipitação por mês.

**PCPSKW** – Este parâmetro é um coeficiente de assimetria da precipitação diária em um determinado mês. O mesmo quantifica a simetria da distribuição da precipitação em torno da média. A estimativa do mesmo é dada por:

$$g_{mon} = \frac{N \cdot \sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - R_{mon})}{(N-1) \cdot (N-2) \cdot (\sigma_{mon})} \quad (7)$$

Onde, N o número total de registros dos eventos de precipitação diária no mês,  $R_{day,mon}$  o quantitativo pluviométrico para o registro d no mês, dado em mm,  $R_{mon}$  a precipitação média no mês e  $\sigma_{mon}$  corresponde ao desvio padrão da precipitação diária no mês.

**PR\_W1** - Este parâmetro representa a probabilidade de um dia úmido seguir um dia seco em um determinado mês. O mesmo é dado por:

$$P_i(W/D) = \frac{days_{W/D,i}}{days_{dry,i}} \quad (8)$$

Onde,  $P_i(W/D)$  é a probabilidade de um dia úmido seguir de um dia seco em um determinado mês i,  $days_{W/D,i}$  é o número de vezes que um dia de chuva seguiu de um dia seco no i para todo o período de registro e  $days_{dry,i}$  representa o número de dias secos no mês i durante todo o período registrado.

**PR\_W2** - Este parâmetro representa a probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido em um determinado mês, onde o mesmo é calculado com base na seguinte equação:

$$P_i(W/W) = \frac{days_{W/W,i}}{days_{wet,i}} \quad (9)$$

Onde,  $P_i(W/D)$  é a probabilidade de um dia úmido seguir de um dia úmido em um determinado mês i,  $days_{W/W,i}$  é o número de vezes que um dia de chuva seguiu de um dia de chuva no i para todo o período de registro e  $days_{wet,i}$  representa o número de dias úmidos no mês i durante todo o período registrado. Vale ressaltar que um dia é considerado seco quando a precipitação registrada é de 0 mm e úmido quando maior que esse valor.

**PCPD** (*mon*) - Número médio de dias de precipitação no mês. Este parâmetro é calculado por:

$$d_{wet,i} = \frac{days_{wet,i}}{yrs} \quad (10)$$

Onde,  $d_{wet,i}$  o número médio de dias de precipitação no mês  $i$ ,  $days_{wet,i}$  representa o número de dias úmidos no mês  $i$  durante o período de registro e  $yrs$  é o número de anos registrados.

**RAINHHMX** - Precipitação máxima na primeira 0,5 hora no período de registro no mês (mm). Este valor representa os extremos de precipitação nos primeiros 30 min do período registrado.

**SOLARAV** - Média da radiação solar diária no mês. O valor é calculado pela soma da radiação solar total para cada dia do mês para todos os anos de registro e dividindo pelo número de dias somados:

$$\mu rad_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N H_{day,mon}}{N} \quad (11)$$

Onde,  $\mu rad_{mon}$  é a radiação solar média diária para o mês ( $MJ/m^2/day$ ),  $H_{day,mon}$  é radiação solar total que atinge a superfície da Terra para um dia  $d$  no mês ( $MJ/m^2/day$ ) e  $N$  é o número total de registros de radiação diária por mês.

**DEWPT** - Média da temperatura no ponto de orvalho no mês. Este parâmetro representa a temperatura à qual a pressão de vapor real presente na atmosfera é igual à pressão de vapor de saturação. Este valor é calculado pela soma da temperatura do ponto de orvalho para cada dia do mês para todos os anos do registro e dividido pelo número de dias somados:

$$\mu dew_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{dew,mon}}{N} \quad (12)$$

Onde,  $\mu rad_{mon}$  é a temperatura média diária ponto para o mês,  $T_{dew,mon}$  é a temperatura do ponto de orvalho para o dia  $d$  no mês e  $N$  é o número total de registros de ponto de orvalho por dia durante o mês.

**WND<sub>AV</sub>** - Velocidade média diária de vento no mês (m/s). Este valor é calculado pela soma dos valores médios ou velocidade média do vento para cada dia do mês para todos os anos de registro e dividido pelo número de dias somados:

$$\mu_{wnd_{mon}} = \frac{\sum_{d=1}^N \mu_{wnd,mon}}{N} \quad (13)$$

Neste caso,  $\mu_{wnd_{mon}}$  é a média diária da velocidade do vento para o mês (m/s),  $\mu_{wnd,mon}$  é a velocidade média do vento no mês, N é o número total de registros da velocidade diária do vento por mês.

#### 4.4 Mapeamento e características físicas dos solos

O mapa dos solos encontrados na área de estudo foi obtido a partir do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE), em escala de 1:100.000. O mapeamento foi empreendido pela Secretaria de Produção Rural e Reforma agrária de Pernambuco, em parceria com a Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). A base de dados vetoriais encontra-se no formato *shapfile* (shp).

Em seguida foram adquiridos dados relativos às características físicas de cada classe de solo. Para isto, recorreu-se ao Sistema de Informação de Solos Brasileiros da EMBRAPA (<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>). As informações referem-se ao número e profundidade das camadas dos solos, assim como o teor de silte, argila, areia, carbono e rocha. De posse desses registros, calculou-se as porcentagens de cada um dos componentes para cada uma das camadas dos solos. Em seguida, foram definidos seus grupos hidrológicos conforme suas características físicas, conforme Tabela 2. Os dados foram inseridos em uma Macro no formato Excel.xls, utilizada para gerar os parâmetros dos solos, no formato exigido pelo SWAT (Tabela 3).

Tabela 2 - Classes de solos encontrados na bacia e seus respectivos grupos hidrológicos.

<b>Classes</b>	<b>Grupo Hidrológico</b>
Argissolos Amarelos	A
Argissolos Vermelho-Amarelo	A
Cambissolos	B
Latossolos Amarelos	A
Luvissolos	D
Neossolos Flúvicos	B
Nossolos Litólicos	C
Nossolos Quartizarênicos	C
Nossolos Regolíticos	D
Planossolos	D
Água	D

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 - Parâmetros gerados pela Macro.xls *user soil* com base nos dados dos solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Brígida.

<b>Parâmetros</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
HYDGRP	Grupo hidrológico dos solos	-
SOL_ZMX	A profundidade máxima de enraizamento de perfil	mm
ANION_EXCL	Fração de porosidade a partir do qual são excluídos ânions	-
SOL_CRK	Volume máximo de quebra do perfil do solo.	-
TEXTURE	Textura da camada de solo	-
SOL_Z	Profundidade a partir da superfície do solo para o fundo da camada	mm
SOL_BD	Densidade do solo úmido	Mg/m <sup>3</sup> or g/cm <sup>3</sup>
SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água na camada do solo	mm
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo saturado	mm/hr
SOL_CBN	Teor de carbono orgânico	%
CLAY	Teor de argila	%
SILT	Teor de silte	%
SAND	Teor de areia	%
ROCK	Teor de fragmentos de rocha	%
SOL_ALB	Albedo do solo úmido	-
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo	-
SOL_EC	Condutividade elétrica (parâmetro não ativo no momento)	dS/m

Fonte: elaborado pelo autora partir de informações disponíveis no manual do usuário do ARNOLD et al. (2012).

#### 4.5 Modelo digital de elevação

O modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo foi gerado a partir da imagem de radar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90 m, disponibilizada por Miranda (2005) no seguinte endereço eletrônico: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/pe/pe.htm>. Para que toda a bacia fosse

perfeitamente abrangida, foram utilizadas quatro cenas (SB-24-Y-C, SB-24-Y-D, SC-24-V-A, SC-24-V-B), posteriormente unidas em ambiente GIS.

#### 4.6 Reservatórios

Os reservatórios utilizados para modelagem encontram-se listados na Tabela 4. Os dados foram adquiridos junto a APAC e correspondem a informações volume (m<sup>3</sup>) e área total do espelho d'água da bacia (m<sup>2</sup>) na cota de descarga. Como o modelo exige um padrão de entrada específico, as unidades foram convertidas de m<sup>3</sup> para 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> e de m<sup>2</sup> para ha.

Tabela 4 - Capacidade de armazenamento dos principais reservatórios inseridos na bacia hidrográfica do rio Brígida

<b>Reservatórios</b>	<b>Capacidade (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>
Algodões	58.481.874	11.574.900
Cachimbo	31.207.006	7.226.280
Chapéu	188.000.000	24.500.000
Engenheiro Camacho	27.664.500	6.391.000
Entremontes	348.297.500	46.833.000
Lagoa do Barro	22.947.850	5.750.000
Lopes II	23.935.360	7.999.600

Fonte: elaborado pelo autor a partir da base de dados da APAC.

#### 4.7 Abastecimento do modelo hidrológico SWAT

##### 4.7.1 Criação do projeto e edição do banco de dados

Inicialmente, o modelo hidrológico SWAT, versão ArcSWAT\_2012.10.18, foi acoplado a interface gráfica do usuário no ArcMap. Com o menu do modelo ativado, utilizou-se a ferramenta *New SWAT Project* para criar o projeto e seu banco de dados, esse ainda com as informações referentes às características físico-naturais dos Estados Unidos. Posteriormente, foi introduzido no banco de dados os arquivos relacionados aos parâmetros físicos dos solos e padrão climático da bacia hidrográfica do rio Brígida. Esse procedimento foi realizado nas opções *User Soil* e *Weather Generator*, respectivamente, no arquivo SWAT2012.mdb, salvo na pasta *database*, que se encontra inserida no diretório escolhido pelo usuário para gravar as informações do modelo.

#### 4.7.2 Delimitação e Subdivisão da Bacia

Para delimitar a área da bacia, inseriu-se no SWAT, por meio da ferramenta *Automatic Watershed Delineation*, a imagem de radar SRTM da área. Com base nas coordenadas X (latitude), Y (longitude), Z (altitude) da mesma, o modelo calculou automaticamente os fluxos de direção e acumulação da água, definindo, em um primeiro momento, os canais de drenagem da área e os pontos de confluência dos rios.

Em seguida, foram inseridos manualmente na rede de drenagem os reservatórios encontrados na área de estudo e os pontos representando as estações que dispõem de dados observados para serem utilizados na etapa de calibração do modelo. Outros pontos foram inseridos ao longo da rede de drenagem, buscando aumentar a quantidade de exutórios e consequentemente o número de sub-bacias. Esse procedimento admite uma maior espacialização dos resultados, permitindo que o modelo, na etapa de ajuste, seja parametrizado de forma mais distribuída, respeitando assim a variação espacial dos processos físicos. Ao todo, foram delimitadas 80 sub-bacias, considerando os reservatórios, com tamanho médio de 17.000 ha.

Após inserção dos dados citados, executou-se a ferramenta *Delineate Watershed* para delimitar a bacia do rio Brígida a partir do exutório principal. O processo foi finalizado por meio da ferramenta *Calculate Subbasin Parameters*, responsável por calcular os parâmetros físicos da bacia, como largura e comprimento dos canais, profundidade, rede de fluxo, entre outros.

#### 4.7.3 Definição das unidades de resposta hidrológica

Na etapa seguinte, foram criadas as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU), método que realiza uma nova subdivisão da bacia. Para isso, foram introduzidos no SWAT, por meio da ferramenta *“Land Use/Soils/Slope Definition”*, os mapas de uso e cobertura da terra, solos e declividade do terreno, esse último gerado dentro do próprio modelo com base nos dados de SRTM. Os mapas foram sobrepostos no modelo e cruzados, combinando as classes homogêneas de cada atributo. Na opção *“HRU definition”* foram definidos os intervalos de porcentagem para eliminação de classes menores que o total da área. Dessa forma, definiu-se para cada atributo um intervalo de 10%, conforme recomendado Arnold et al. (2012). Assim, as classes com área menor que esse valor, são agrupadas a outras dominantes no local.

#### 4.8 Simulações do modelo hidrológico SWAT

Com o SWAT devidamente abastecido, a etapa posterior consistiu em escrever as tabelas, processo no qual todas as informações são parametrizadas e gravadas no banco de dados do modelo. Para isso, utilizaram-se as ferramentas *Write Input Tables/Weather Stations/Write SWAT Input Tables*. Em seguida, definiu-se o período de *warm up* do modelo (aquecimento), que corresponde primeira simulação, quando os componentes do sistema ainda não foram dinamizados. Diante dos testes realizados, definiu-se um intervalo de cinco anos (1996 -2000), o qual não é contabilizado para o período de análise da vazão (2001 - 2008). Por conseguinte, fez-se uso das ferramentas *SWAT Simulation/Run SWAT* para rodar o modelo com base na equação que simula o ciclo hidrológico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (14)$$

Onde,  $SW_t$  é o conteúdo final de água no solo (mm),  $SW_0$  representa o conteúdo inicial de água no solo no dia  $i$  (mm),  $t$  é o tempo (dias),  $R_{day}$  indica a quantidade de precipitação no dia  $i$  (mm),  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial no dia  $i$  (mm),  $E_a$  é a evapotranspiração no dia  $i$  (mm),  $w_{seep}$  é a percolação no dia  $i$  (mm) e  $Q_{gw}$  é o fluxo de retorno no dia  $i$ .

A estimativa do escoamento superficial é baseada no método da Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service-SCS*.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (15)$$

Onde,  $Q_{surf}$  é escoamento acumulado diário (mm),  $R_{day}$  é a precipitação pluvial diária (mm),  $I_a$  é a subtração inicial que inclui o armazenamento de superfície, interceptação e infiltração anterior (mm) e  $S$  é o parâmetro de retenção (mm). É importante salientar que o parâmetro de retenção varia espacialmente devido a mudanças nos solos, uso e cobertura da terra, gestão, declividade do terreno; e temporalmente, devido a mudanças no conteúdo de água do solo. Dessa forma, o parâmetro de retenção é calculado a partir da seguinte equação:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (16)$$

Onde, CN é a curva número para o dia.

Quanto a estimativa da evapotranspiração, o SWAT permite o uso três possíveis métodos para cálculo da variável: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Montheith. No presente estudo, utilizou-se o método proposto por Hargreaves, visto que o mesmo produziu melhores resultados diante dos testes realizados. Dessa forma, o cálculo da evapotranspiração foi baseado na seguinte equação:

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\Gamma_{av} + 17.8) \quad (17)$$

Sendo,  $\lambda$  o calor latente para vaporização ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ),  $E_o$  é a evapotranspiração potencial ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $H_0$  representa a radiação solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $T_{mx}$  é a temperatura máxima do ar no dia ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{mn}$  é a temperatura mínima do ar no dia e ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $\Gamma_{av}$  é a temperatura média do ar para um dado dia ( $^{\circ}\text{C}$ ).

O parâmetro referente a percolação é calculado pelo modelo com base na técnica de propagação do armazenamento, procedimento representado na equação a seguir:

$$SW_i - SW_{oi} \exp\left(\frac{\Delta t}{TTt}\right) \quad (18)$$

Onde, SW indica a umidade no início do dia,  $SW_o$  representa a umidade do solo no fim do dia,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (h), TT é o tempo de propagação através das camadas e  $i$  é o índice de identificação da camada do solo.

Por conseguinte, a estimativa da percolação é dada pela equação descrita abaixo:

$$P_i = SW_{oi} \left[ 1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{TTt}\right) \right] \quad (19)$$

Onde,  $P_i$  é a percolação em mm/dia.

Quanto ao tempo de percolação, esse é único para cada camada e é dado pela seguinte equação:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (20)$$

Sendo,  $SAT_{ly}$  a quantidade de água na camada do solo quando o mesmo se encontra totalmente saturado (mm),  $FC_{ly}$  a umidade do solo quando atingida a capacidade de campo e  $K_{sat}$  a condutividade hidráulica saturada para a camada ( $mm \cdot h^{-1}$ ).

#### 4.8.1 Manejo da vegetação

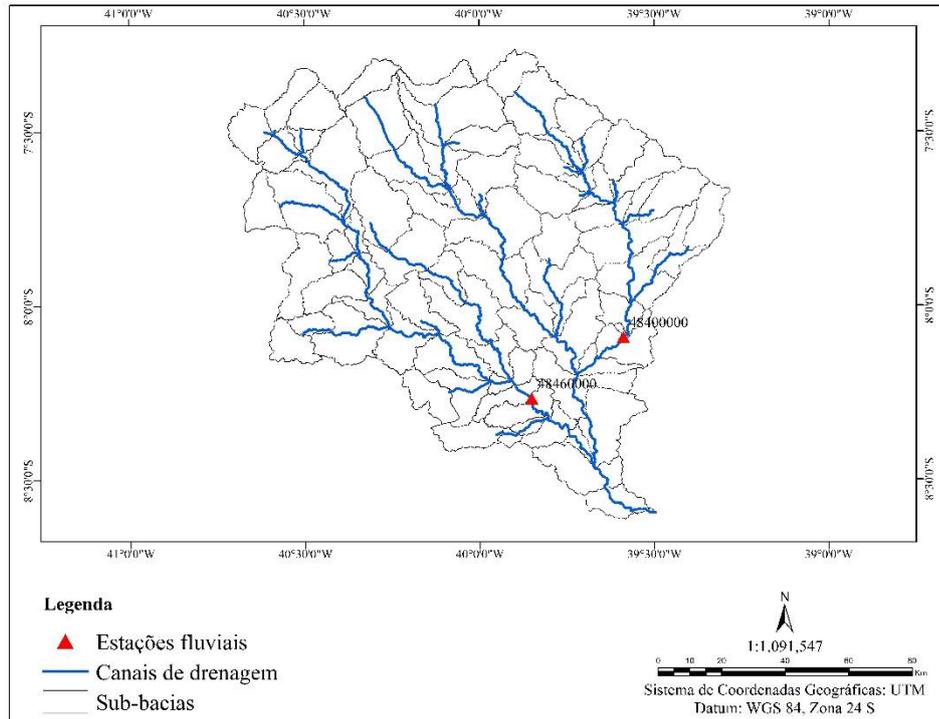
No banco de dados do SWAT a dinâmica de crescimento e dormência da vegetação não é regida pela precipitação como ocorre no semiárido. Ao invés disso, é controlada pelas unidades de calor, que corresponde ao somatório das temperaturas durante as estações do ano. Por essa razão, a dinamização do comportamento da vegetação é feita por meio de datas, seguindo o padrão das estações consideradas secas e chuvosas. Para isso, empregou-se a ferramenta *Management*, onde inseriu-se os períodos de crescimento da vegetação e manutenção da folhagem (dezembro a julho) e de dormência (agosto a novembro).

### 4.9 Calibração do modelo hidrológico SWAT

Para calibrar e validar o modelo foi empregado o *software* SWAT-CUP, versão 5.1.6.2, disponível para *download* gratuito (<http://swat.tamu.edu/software/swat-cup>). Inicialmente foi criado um novo projeto. Para isto, recorreu-se a ferramenta *New Project*, que exibe uma caixa de diálogo para que o usuário importe o projeto do ArcSWAT, salvo na pasta “*scenarios*”, localizada no diretório escolhido durante as configurações iniciais, ainda no ArcGIS.

Em seguida, foi escolhido o método para calibração e análise de incerteza, onde definiu-se o *Sequential Uncertainty Fitting* (SUF2), considerado mais indicado para o objetivo proposto, conforme manual do usuário (ARNOLD et al., 2012). Após a criação do projeto, inseriu-se no programa os dados de vazão observada, em formato de coluna, com informações referentes ao ano, mês e valor de fluxo. Foi utilizado no presente estudo o posto fluviométrico 4846000, conforme Figura 8, localizado no município de Parnamirim. A série observada se estende de 2001 a 2008. Vale ressaltar que existem outros postos fluviométricos na bacia, a exemplo da estação fluvial 484000. Porém, as séries apresentam grande quantidade de falhas e repetições sistemáticas do mesmo valor durante longos períodos.

Figura 8 - Distribuição espacial dos postos fluviométricos da bacia hidrográfica do rio Brígida empregados na etapa de calibração do modelo hidrológico SWAT.



Fonte: elaborado pelo autor.

O procedimento seguinte consistiu na definição dos parâmetros sensíveis para ajuste do modelo. Seguindo as recomendações do manual do usuário, foram identificados cerca de 40 parâmetros que podem influenciar de maneira significativa ou não na calibração do SWAT. Inicialmente foram realizadas 100 simulações com todos os parâmetros. Com base nos resultados de sensibilidade gerados pelo SWAT-CUP, os parâmetros não sensíveis ou pouco sensíveis, foram descartados, restando apenas os considerados estatisticamente significantes. Por fim, foram rodadas 600 simulações no SWAT-CUP, com os parâmetros variando nos intervalos considerados ideais. No presente estudo, optou-se por realizar uma calibração anual com validação mensal.

Para avaliar o grau de ajuste do modelo empregou-se o coeficiente de Nash e Sutcliffe, calculado a partir da seguinte equação:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (21)$$

Onde,  $E_m$  a vazão observada,  $E_s$ , a vazão simulada pelo modelo,  $\bar{E}$  indica a média da vazão observada para o período de simulação, enquanto  $n$  é o número de eventos.

#### 4.10 Cenários de disponibilidade hídrica

Para estimar o grau de disponibilidade hídrica *per capita* na bacia do rio Brígida empregou-se a equação descrita a seguir:

$$DHHP = \frac{RESt}{Pt} \quad (22)$$

Onde, DHHP representa a disponibilidade de água por habitante por ano, RESt corresponde ao total de água armazenado pelos reservatórios da bacia por ano e Pt é a população total da bacia.

Para projetar a população total da bacia hidrográfica do rio Brígida, utilizou-se a equação de projeção geométrica proposta por Rocha, Brito Filho e Silva (2011):

$$P_{pt} = p_1(1 + txa)^{ia} \quad (23)$$

Onde,  $p_1$  é a população total do ano do último censo,  $txa$  corresponde à taxa de crescimento geométrico anual por município (%) e  $ia$  representa o intervalo em anos do censo base da projeção (ano anterior) para o ano projetado.

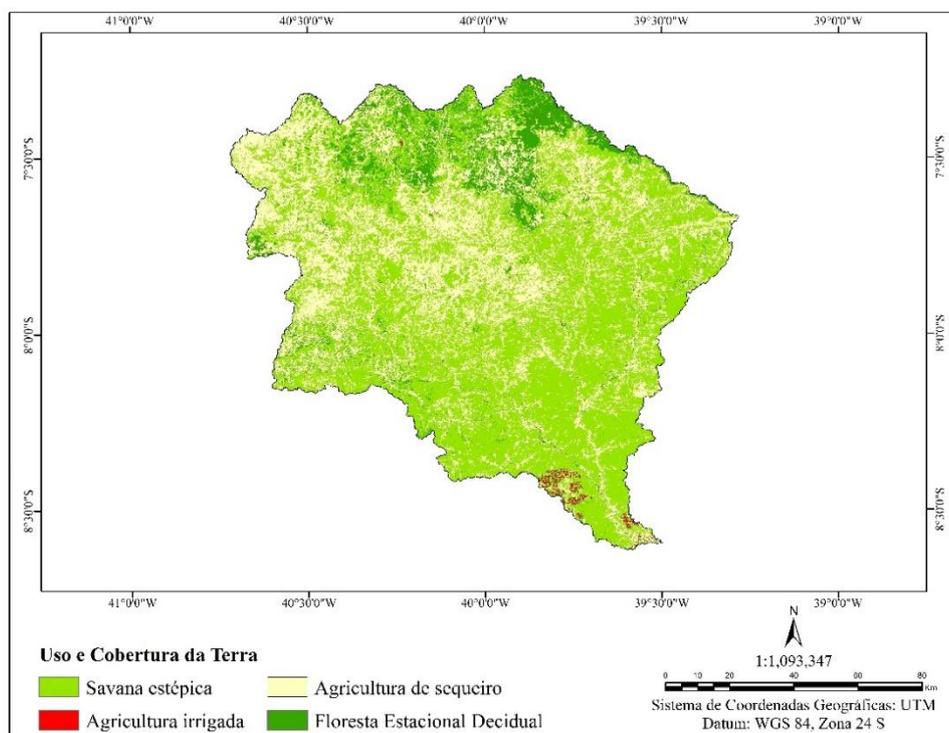
Quanto aos cenários climáticos, foram empregados os modelos CCCMA e MIROC, cenário B1, para o período de 2046 a 2064. Os dados podem ser baixados gratuitamente em <http://globalweather.tamu.edu/cmip>. São informações referentes a precipitação média diária e temperatura máxima e mínima diária. Após organização destas, as mesmas foram devidamente inseridas no SWAT, do qual extraiu-se o acumulado nas bacias hidráulicas, tanto para o período calibrado quanto para o projetado. A análise foi realizada para o período de 2050 a 2064, uma vez que os primeiros 4 anos foram empregados na etapa de aquecimento do modelo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Mapeamento do uso e cobertura da terra

O resultado da classificação supervisionada das imagens do Landsat 8 pode ser visualizado na Figura 9, a qual expõe quatro classes de uso da terra. Observa-se o predomínio da Savana Estépica, mais conhecida como Caatinga do Sertão árido, tipologia que ocupa 54,5% da área de estudo. A referida categoria pode ser encontrada em toda a bacia, porém com limitações no centro e a montante. A Savana Estépica pode ser dividida em dois subgrupos. O primeiro é a Savana Estépica Arborizada (Caatinga arbustiva), cujas características principais são o baixo porte e fisionomia arbustiva. Sob certas condições, podem formar paisagens com florestas adensadas, enquanto e em outras ou os indivíduos apresentam espaçamentos naturais, formando clareiras. O segundo subgrupo corresponde a Savana Estépica Florestada (Caatinga arbórea), caracterizada pela presença indivíduos de porte elevado, variando entre 5 e 7 m, com troncos grossos e engalhamento espinhoso bastante ramificado (IBGE, 2012).

Figura 9 - Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida para o ano de 2015.



Fonte: elaborado pelo autor.

O bioma Caatinga é bem adaptado às condições de escassez hídrica do semiárido. Entre as principais características morfológicas adaptativas das espécies vegetais encontradas no

referido domínio, destacam-se os estômatos protegidos, espessa camada de cera, tecidos armazenadores de água mais eficientes e aprofundamento do sistema radicular (BARROS; SOARES, 2013; TROVÃO et al., 2007). Durante o período seco, normalmente entre os meses de julho e novembro, a maior parte dos indivíduos perde sua folhagem, processo no qual a planta degrada o conteúdo de clorofila B, responsável pela transferência de energia para a clorofila A, que a transforma em energia química durante fotossíntese (HAVAUX, 1992). Para Amorim, Sampaio e Araújo (2009), esse mecanismo é responsável pela redução do estresse luminoso e controle da perda de água por evapotranspiração, o que contribui para a manutenção das funções vitais das plantas durante a estação seca.

A dinâmica mencionada produz efeito direto sobre a cobertura foliar das áreas ocupadas pela Caatinga. Galvêncio et al. (2013) destacam que em condições de deficiência hídrica, o Índice de área Foliar (IAF) médio da vegetação varia em torno de  $0,7 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , enquanto no período chuvoso pode ultrapassar 2,0. Este padrão sazonal causa modificações no potencial de interceptação de água da chuva pela vegetação ao longo do ano. Embora no período de estiagem seja difícil de aferir a interceptação da água da chuva pela Caatinga, Albuquerque e Costa (2012) pontuam que no início da estação chuvosa, quando a vegetação inicia seu processo de regeneração, a presença de galhos secos ajuda a diminuir a quantidade de água que chega ao solo. Quando as espécies regeneram totalmente sua folhagem, o nível de interceptação varia de acordo com a intensidade da chuva, tanto para as espécies arbóreas quanto para as arbustivas. Porém, em uma comparação entre ambas, os autores observaram que as espécies arbóreas conseguem reter mais água em suas copas.

Outra categoria de uso da terra que se destaca na área estudada é a agricultura de sequeiro. Bem distribuída ao longo da área da bacia, a classe ocupa 35,4% da superfície, com maior representatividade à jusante, porção noroeste. De acordo com Lopes et al. (2010), o sistema agrícola de sequeiro representa uma das principais fontes de renda da maioria dos municípios inseridos na bacia. Geralmente associado a pecuária, enquadra-se também como uma das principais forças motrizes para degradação ambiental na região. Esse modelo agrícola é altamente dependente das condições atmosféricas. Por essa razão, a semeadura/plantio nos perímetros ocorre no início do período chuvoso, com colheita programada para o fim. Desse modo, problemas relacionados à erosão hídrica são muito comuns nessas áreas, devido às chuvas intensas que atingem os solos desprotegidos com máximo potencial de energia cinética. Vale salientar que esse efeito é minimizado na medida em que a vegetação agrícola passa a se desenvolver e proteger a superfície, controlando a erosão e o carreamento de sedimentos pelo

escoamento superficial (AZEVEDO; SILVA, 2007; SANTOS; MONTENEGRO; PEDROSA, 2009).

Quanto a Floresta Estacional Decidual, esta, restringe-se à região localizada a montante da bacia, sobre o topo plano e áreas de encosta da unidade geoambiental da chapada do Araripe. Com área de 9,4%, sua presença é fortemente influenciada por totais pluviométricos mais elevados (chuvas orográficas) em relação aos verificados na porção assentada sobre a depressão sertaneja (COSTA; ARAÚJO; LIMA-VERDE, 2004; MELO; MELO; SOUSA, 2011). A Floresta Estacional Decidual, assim como a Savana Estépica, é bem adaptada à dupla estacionalidade climática do semiárido. Porém, durante o período de baixo potencial hídrico na região, pelo menos 50% dos indivíduos conseguem manter sua folhagem (IBGE, 2012), minimizando os efeitos erosivos das chuvas e a velocidade de escoamento superficial.

No que se refere ao modelo de agricultura irrigada, esta categoria de uso corresponde a menor área da bacia (0,61%), com concentração na região a jusante. Aos poucos, em diversas localidades do semiárido, a agricultura irrigada vem substituindo as práticas de sequeiro, muito em função do maior potencial de produção em relação segunda. É importante ressaltar que, de modo geral, assim como ocorre com as práticas de sequeiro, o plantio das espécies, em sua maior parte frutuosas, ocorre durante o período chuvoso. O manejo é um dos grandes desafios dentro desse modelo de produção. Problemas como salinização, perda de fertilidade do solo e erosão hídrica são muito comuns nessas áreas.

De maneira geral, observa-se que a bacia hidrográfica do rio Brígida apresenta avançado grau de deterioração de sua vegetação natural. Somando as áreas de uso antropogênico, estas alcançam um total de 36%, contra 64% das áreas classificadas como coberturas naturais. Em uma região onde a escassez hídrica é uma realidade marcante, o desmatamento tende a agravar ainda mais o problema. Os efeitos principais recaem sobre o aumento do escoamento superficial, diminuição da infiltração da água no solo e redução da evapotranspiração média anual. A dinâmica exposta causa, entre outros prejuízos, a diminuição da disponibilidade hídrica, que afeta tanto o funcionamento dos sistemas naturais, quanto o abastecimento humano (LI; ISHIDAIRA, 2012; NIE et al., 2011; PEEL, 2009).

## 5.2 Calibração do modelo hidrológico SWAT

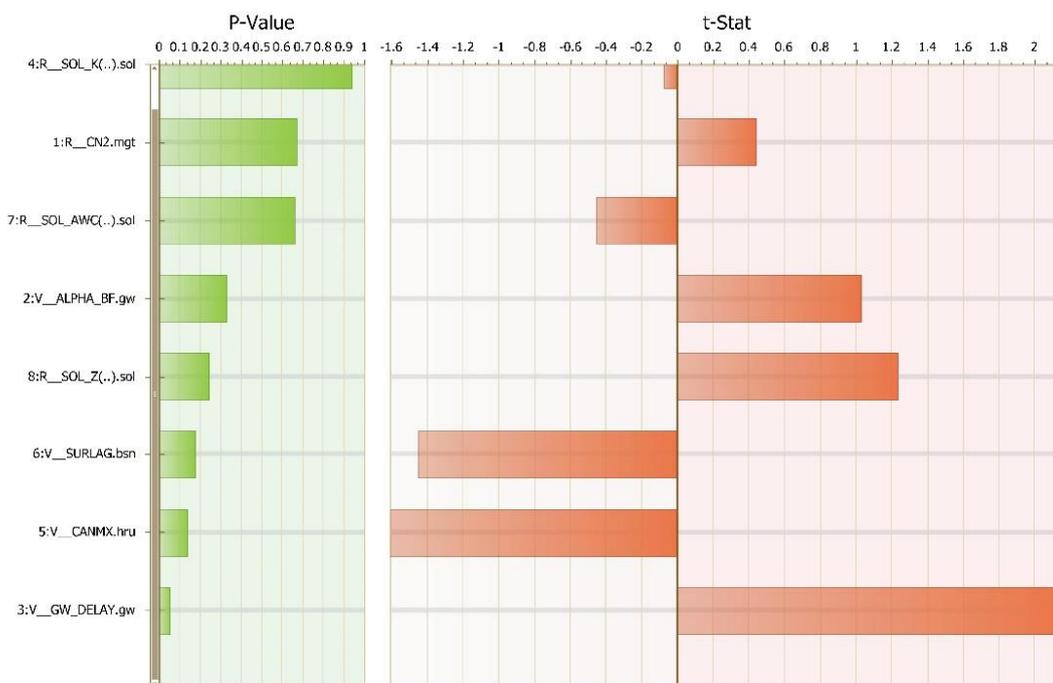
### 5.2.1 Análise de sensibilidade dos parâmetros

Após abastecimento e simulação do modelo, o primeiro resultado indicou que o SWAT não conseguiu detectar o padrão da vazão da bacia do rio Brígida. Com isto, tornou-se praticamente impossível calibrar o modelo, uma vez que, conforme testes realizados, para que seja possível o ajuste a simulação deve apresentar um acerto próximo de 50%, alcançado na segunda tentativa após exclusão de alguns postos pluviométricos.

Na terceira tentativa, realizou-se o manejo da vegetação, o qual consiste em adequar sua dinâmica de crescimento e dormência a realidade da região. Este procedimento foi suficiente para a melhora da simulação, a qual apresentou um coeficiente de Nash-Soutcliffe de 0,83 e  $R^2 = 0,90$ , isto sem que fosse realizado qualquer procedimento de calibração dos parâmetros.

Diante da evolução dos resultados, partiu-se para análise de sensibilidade para definição dos parâmetros mais sensíveis, cujos resultados podem ser observados na Figura 10. Esta exibe o nível de significância estatística da sensibilidade de cada um dos parâmetros, para o *P-value* e *t-Stat*, após os mesmos alcançarem o valor considerado ideal para a simulação.

Figura 10 - Nível de significância estatística dos parâmetros mais sensíveis na simulação final



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que apenas o parâmetro GW\_DELAY ainda mostra significância estatística ao nível de 90% para sensibilidade. Entretanto, para que haja mudanças significativas na simulação da vazão, o parâmetro deve estar dentro de um intervalo de significância de 95%. Quanto aos demais parâmetros, a maior parte perdeu sensibilidade depois de alcançados os valores ideais. Vale ressaltar que alguns testes realizados indicaram que a remoção de qualquer um deles, mesmo aqueles que apresentaram menor sensibilidade dentro desta combinação, como é o caso do SOL\_K, interfere no resultado final, fazendo com que o modelo perca eficiência na simulação.

Além de indicar que os parâmetros alcançaram seu valor ideal de variação, o *P-value* e o *t-Stat* também revelam quais os parâmetros mais influenciaram no resultado final da simulação da vazão. No presente estudo, no que se refere a CN2, há uma exceção ao que é verificado na maioria dos estudos. De acordo com Lelis et al. (2012), o referido parâmetro é um dos que, na maioria dos casos, apresenta maior sensibilidade na simulação da vazão. Isto pode ser confirmado no estudo desenvolvido por Fernandes (2015), onde o autor calibrou o SWAT para a bacia do rio São Francisco, da qual o rio Brígida é um dos afluentes. Na referida pesquisa, o nível de significância estatística para sensibilidade do parâmetro ficou dentro de um intervalo de confiança de 95%, fazendo da CN2 o mais sensível na simulação. No presente estudo, como pode ser observado na Figura 10, a CN2 é o segundo parâmetro menos sensível, influenciando pouco no resultado da simulação. Isto pode ser confirmado tanto pelo *P-value* quanto pelo *t-Stat*.

Na Tabela 5 pode ser visualizado o conjunto de parâmetros e seus valores fixos finais empregados na calibração do SWAT para simulação da vazão anual da bacia hidrográfica do rio Brígida. A seleção dos mesmos ocorreu após análise de sensibilidade, onde os intervalos de variação foram obtidos após realização de 210 simulações, com 600 iterações por rodada. O conjunto de parâmetros referem-se ao escoamento superficial e fluxo dinâmico de base. Ao todo foram identificados oito parâmetros sensíveis, os quais, segundo Arnold et al. (2012), encontram-se entre os mais utilizados em diversos outros estudos voltados para calibração de vazão em bacias hidrográficas.

É representativo o quantitativo de parâmetros sensíveis (37,5%) que estão diretamente relacionados com as características físicas dos solos, sendo eles SOL\_K, SOL\_AWC e SOL\_Z. O nível de incerteza adotado para o intervalo de variação foi de -10% a 10%. O maior valor percentual de ajuste refere-se ao SOL\_AWC (10%), enquanto os demais foram de 3% (SOL\_k) e -3% (SOL\_Z). Geralmente esses pequenos ajustes são necessários para correção de erros que se acumulam nos dados de entrada, seja na coleta ou interpretação dos mesmos. Porém, verifica-

se que as adequações realizadas não extrapolam o limiar representativo da realidade física da bacia.

Os demais parâmetros seguiram tendência parecida aos relacionados às características físicas dos solos, com exceção do CANMX, que corresponde a água interceptada pela vegetação. O intervalo fixado pelo modelo foi de 2,03 mm para todos os tipos de cobertura vegetal encontradas na bacia, independente da intensidade da precipitação pluviométrica. Este resultado, de modo geral, diverge dos encontrados a partir de estudos experimentais como o desenvolvido por Albuquerque e Costa (2012) para a Caatinga. Os autores destacam que a depender do estado da vegetação e do volume de chuva, o índice de interceptação pode chegar a cerca de 35%. Isto demonstra que o SWAT não consegue representar bem o referido dinamismo, o que pode implicar em perda de sensibilidade para eventos de chuva mais baixos. É importante salientar que o SWAT não possui em seu banco de dados de vegetação informações sobre os tipos e características físicas das tipologias vegetais tropicais. Logo, para este atributo, necessitou-se realizar adaptações, o que pode explicar este valor generalizado.

Tabela 5 - Conjunto de parâmetros mais sensíveis e seus respectivos intervalos de variação para simulação da vazão anual do rio Brígida.

Parâmetros	Definição	Valor fixo
r__CN2.mgt	Curva número do escoamento superficial	-0,1
v__ALPHA_BF.gw	Fator alfa do fluxo de base	0,3
v__GW_DELAY.gw	Tempo de atraso das águas subterrâneas (Dias)	27,7
r__SOL_K().sol	Condutividade hidráulica do solo	0,03
v__CANMX.hru	Interceptação da água da chuva pela vegetação	2,03
v__SURLAG.bsn	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto	4,7
r__SOL_AWC().sol	Capacidade de água disponível por camada de solo	0,1
r__SOL_Z().sol	Profundidade da superfície do solo para o fundo da camada	-0,03

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.1 Análise de desempenho do modelo hidrológico SWAT

Diferentes critérios foram empregados para avaliação das predições individuais do modelo SWAT, entre os quais destacam-se coeficiente de Nash- Sutcliffe, coeficiente de determinação, PBIAS e Pearson (Tabela 6). O coeficiente de Nash foi analisado individualmente para avaliação da capacidade do modelo representar a realidade a cada iteração. Atingido o intervalo máximo de variação dos parâmetros, obteve-se coeficiente de Nash = 0,92, intervalo classificado com muito bom, segundo Nash e Sutcliffe (1970).

Quanto ao volume de água simulado pelo SWAT, comparado ao observado, observa-se que o PBIAS encontra-se dentro de um intervalo considerado muito bom (0,6%). Para este teste, os valores próximos de 0 são considerados ideais. Quando positivos, indicam que o modelo está superestimando o fluxo em relação ao observado, enquanto os negativos referem-se aos fluxos subestimados. O intervalo máximo para uma simulação considerada aceitável varia entre -25% e 25%.

Em relação ao valor da correlação de Pearson, também foram observados resultados bastante positivos quanto eficiência da simulação. Além da alta correlação entre o simulado e o observado, constatou-se também significância estatística ao nível de 95%, confirmando o bom desempenho do SWAT para a predição da vazão média anual.

Outro índice que atesta a eficiência do modelo SWAT para a simulação da vazão do rio Brígida é o RSR, que variou dentro da faixa do ótimo, conforme sugerido por Moriasi et al. (2007). Os autores destacam que um modelo bem ajustado deve variar entre 0 e 0,5. Onde 0 corresponde a um ajuste perfeito e até 0,5 um bom ajuste. Este teste corresponde a razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações, sendo esta uma das estatísticas bem utilizadas nas análises de desempenho do de modelos hidrológicos.

De maneira geral, os resultados obtidos a partir das análises estatísticas comprovam o bom ajuste do SWAT a realidade física da bacia do rio Brígida e sua capacidade de representar o fluxo entre os anos de 2001 e 2008.

Tabela 6 - Resumo das estatísticas empregadas para análise de desempenho do modelo hidrológico SWAT para simulação da vazão anual da bacia hidrográfica do rio Brígida.

Estatística	Valor	Significância
Nash-Sutcliffe	0,92	-
PBIAS	0,6%	-
Pearson	0,93	0,01
RSR	0,2	-

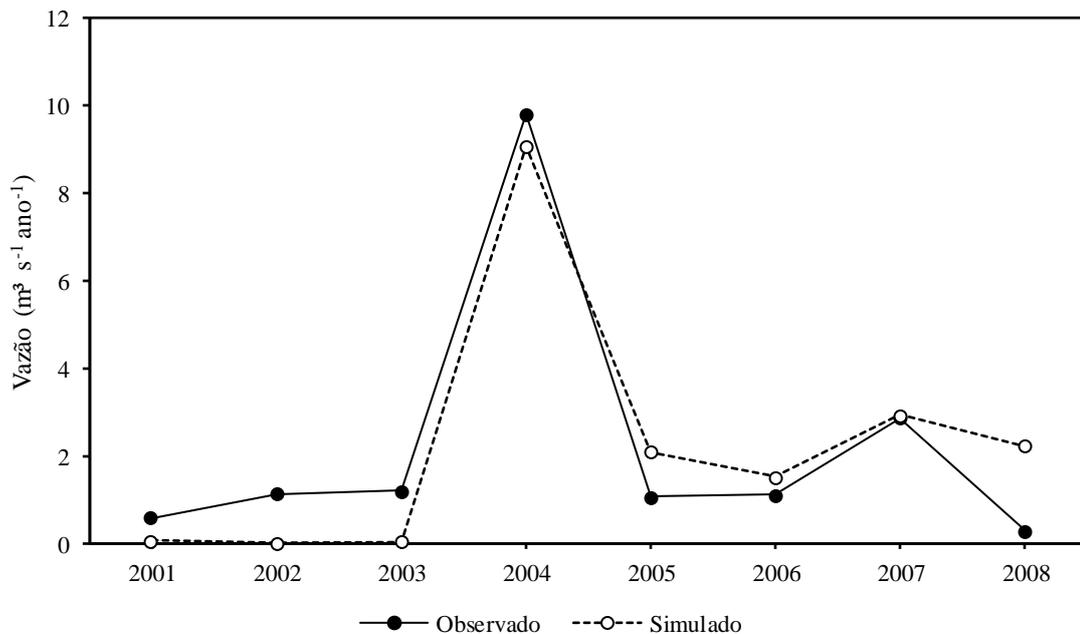
Fonte: elaborado pelo autor.

### 5.2.2 Comportamento da vazão anual

A comparação entre a curva vazão média anual observada para o período de 2001 a 2008 e a simulada pelo modelo SWAT está representada na Figura 11. O referido período corresponde a intervalos bem definidos de anos secos e chuvosos, com dados de vazão

observada sem falhas. Verifica-se que o modelo consegue detectar a sazonalidade da precipitação pluvial, transformada em vazão, ao longo dos anos. Porém, verifica-se que entre 2001 e 2003, o SWAT subestima o volume médio.

Figura 11 - Comparação entre a vazão média anual observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT para o rio Brígida.



Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto ao intervalo entre 2003 e 2005, apesar de continuar subestimando o volume de vazão, o SWAT detecta bem o sinal para o ano de 2004, o qual foi considerado bastante chuvoso. É justamente para esse período que o modelo apresenta melhor desempenho. A média da precipitação total anual para a bacia do rio Brígida entre 2001 e 2008 foi de 456,1 mm, enquanto para o ano de 2004 o volume médio de chuvas foi de 555,5 mm, 21% maior. Entre 2005 à 2008, o volume de vazão decresce em função da redução da precipitação média para o período (464,75 mm), porém, para este intervalo, o modelo passa a superestimar a vazão média.

Apesar do bom ajuste do modelo para simulação da vazão, comprovado a partir das estatísticas empregadas, observou-se que o mesmo apresenta dificuldades para simular os valores de vazão mais baixos, ora subestimando, ora superestimando. E apresenta significativa melhora quando os valores encontram-se próximos ou acima de 4 m³/s/ano. A perda de sensibilidade do SWAT para simulação de períodos secos pode ser atribuída à dificuldade que o mesmo possui para simular o balanço hídrico em ambientes semiáridos e áridos. Este problema foi detectado também por Liew et al. (2007) e Feyereisen et al. (2007) em seus respectivos estudos.

Entre os fatores que podem influenciar negativamente no desempenho na modelagem, pode-se destacar à própria estrutura conceitual do SWAT, voltada principalmente para as características físicas Hemisférios Norte. Um bom exemplo é como a dinâmica da vegetação é controlada. Segundo Arnold et al. (2012), o comportamento da vegetação, dormência e crescimento, é controlado por unidades de calor. As unidades de calor são índices que representam o somatório das temperaturas para cada estação do ano. Deste modo, em regiões semiáridas, onde essa variação não é bem definida, a sensibilidade do modelo é comprometida. Soma-se a isto o fato do crescimento e desenvolvimento da vegetação de Caatinga responder à quantidade de água armazenada nos solos.

Para contornar o referido problema, estabelece-se um controle por meio de datas, ou seja, força-se o modelo a admitir que a vegetação vai variar de acordo com os períodos do ano. Para uma região características físicas tão peculiares como o Semiárido, este ajuste funciona melhor do que a opção de unidades de calor. Porém, é preciso salientar que a região é marcada por uma forte variabilidade espaço-temporal da precipitação. Assim, o modelo tende a não considerar esses aspectos. Este fator apresentado, somado a falta de uma melhor distribuição espacial das estações, podem explicar o aumento do erro para simular os períodos secos.

De modo geral, mesmo com as limitações apontadas, o SWAT teve um desempenho considerado muito bom. Porém, é perceptível a necessidade de desenvolvê-lo de maneira mais voltada para as características físicas das áreas tropicais.

### 5.2.3 Análise de desempenho do modelo para a simulação da vazão mensal

Com o modelo devidamente ajustado e com os novos intervalos dos parâmetros importados para dentro do ArcSwat, foi realizada uma nova simulação, desta vez para escala mensal. O desempenho do modelo para a simulação da vazão mensal pode ser avaliado por meio do conjunto de testes estatísticos expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo das estatísticas empregadas para análise de desempenho do modelo hidrológico SWAT para simulação da vazão mensal da bacia hidrográfica do rio Brígida.

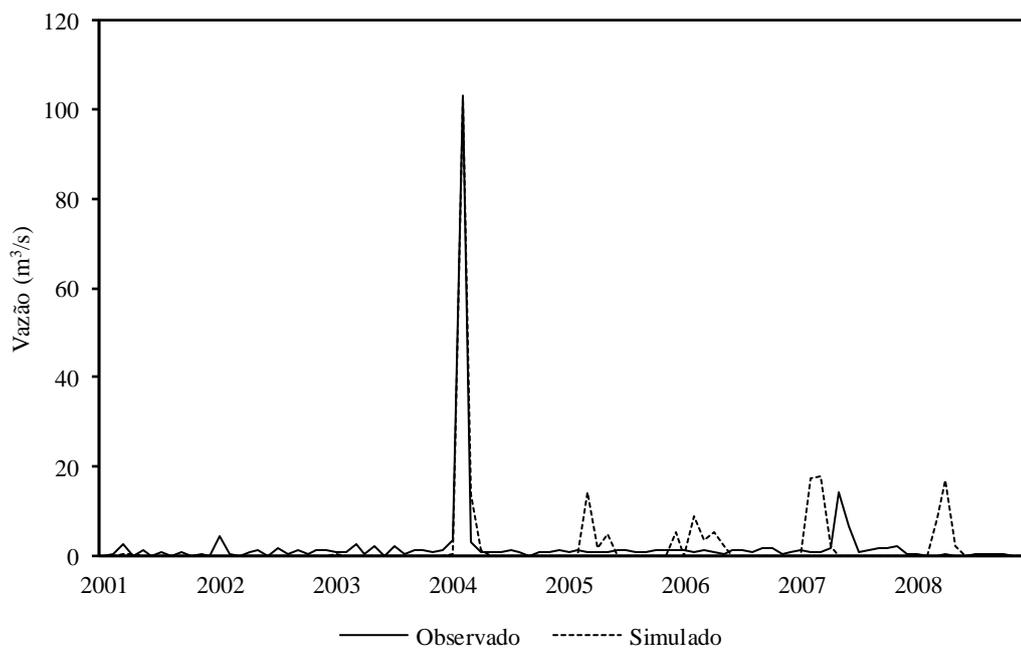
Estatística	Valor	Significância
Nash-Sutcliffe	0.84	-
PBIAS	-7%	-
Pearson	0,92	0,00
RSR	0,38	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Quando comparados os resultados da simulação mensal com a anual, verifica-se que as maiores variações são observadas para o coeficiente de Nash, PBIAS e RSR. Por outro lado, a oscilação verificada não foi significativa, visto que todos continuam dentro do intervalo considerado muito bom.

A comparação entre a vazão média mensal observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT é exposta na Figura 12. Como observado para a vazão anual, o modelo mostrou-se bastante sensível para detecção de valores de vazão correspondentes aos anos mais úmidos, no caso o de 2004. Para este ano, a vazão média do rio alcança  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que pode ser considerado um evento hidrológico extremo. O modelo mostrou-se bastante eficiente para a simulação deste ano, com um erro relativo de apenas 0,4%.

Figura 12 - Comparação entre a vazão média anual observada e a simulada pelo modelo hidrológico SWAT para o rio Brígida.



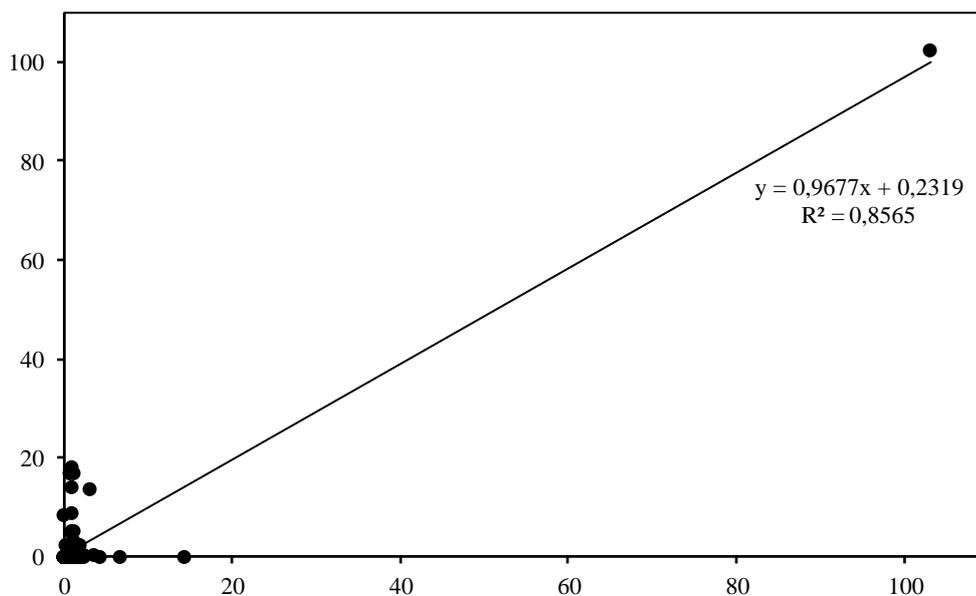
Fonte: elaborado pelo autor

É importante ressaltar que a detecção do pico observado em 2004, foi determinante para melhora dos resultados estatísticos aplicados na análise de desempenho do SWAT. Isto pode ser ratificado a partir da análise do coeficiente de determinação linear, exposto na Figura 13.

A partir de 2005, é onde se verifica maior erro de estimativa, indicado pelo PBIAS, com o modelo superestimando o volume para todos os anos. Verifica-se também que o SWAT simula picos de vazão em torno de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , comportamento não constatado nos dados observados. Segundo Arnold et al. (2012), este padrão, geralmente, resulta do uso estações de precipitação não representativas da realidade das bacias. Porém, no presente estudo, realizou-

se uma série de testes com a exclusão e inserção de alguns postos pluviais. Entretanto, esta configuração é a que apresenta os melhores resultados, uma vez que conforme a variação espacial da chuva era perdida, os resultados seguiam piorando sistematicamente.

Figura 13 - Coeficiente de determinação linear de calibração do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: elaborado pelo autor

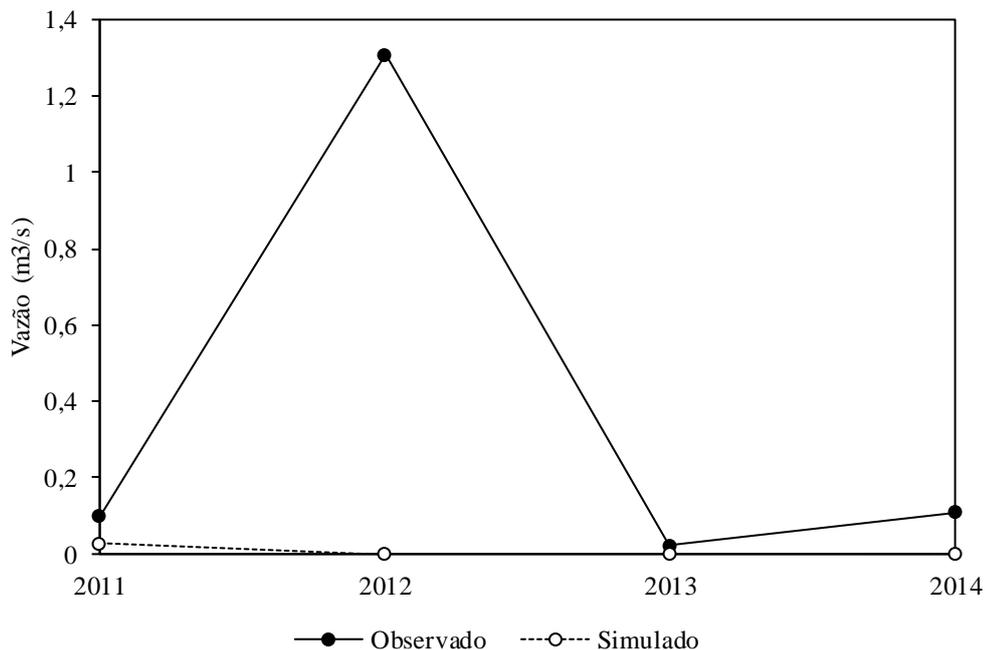
#### 5.2.4 Validação do modelo hidrológico SWAT

O resumo dos resultados encontrados referentes a validação do modelo hidrológico SWAT, para a bacia hidrográfica do rio Brígida, encontra-se exposto na Figura 14 (escala anual) e 15 (escala mensal). O período analisado corresponde a parte da série separada para avaliação do desempenho do modelo quanto predição dos eventos hidrológicos.

Verificou-se que o modelo não conseguiu representar o padrão da vazão para o intervalo de anos entre 2011 e 2014. Tanto para a análise anual quanto para a mensal, o SWAT subestima o volume do escoamento em relação ao observado. No que se refere ao volume anual, a maior discrepância é observada para o ano de 2012. Para o mensal, verifica-se que o modelo projetou maior diferença para o ano de 2013.

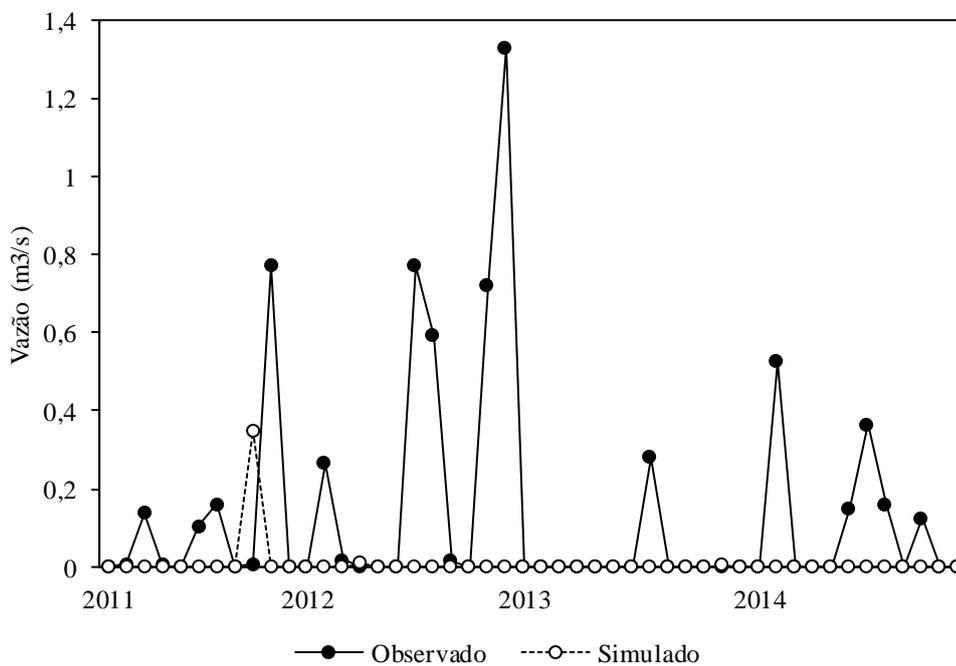
As estatísticas empregadas indicam o desempenho na simulação encontra-se longe de um limiar aceitável. Para o coeficiente de Nash-Soutcliffe, por exemplo, o valor obtido para as duas simulações foi de zero. O mesmo também foi observado para o  $R^2$ . Quanto ao PBIAS, observou-se um valor de subestimativa de 98% para o anual e 100% para o mensal.

Figura 14 - Comparação entre a vazão média anual observada e a estimada para validação do modelo hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 15 - Comparação entre a vazão média mensal observada e a estimada para validação do modelo hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que o volume de vazão observado apresenta valores com variações bastante próximas de zero, intervalo para o qual o SWAT apresentou perda de sensibilidade

durante a calibração. O modelo conseguiu representar os meses e anos com vazão igual a z, não detectando pequenos sinais de variação, estes entre 0,5 e 1,2 m<sup>3</sup>/s.

Um ponto importante diz respeito ao número de datas com valor zero que o SWAT conseguiu prever de forma correta. Dos 48 meses empregados para a validação, em pelo menos 48,3% do período o modelo representou este fluxo. O restante refere-se aos sinais que o modelo não conseguiu detectar, sinais extremamente importantes para a configuração de um melhor resultado para a análise estatística.

Vale salientar que uma série de fatores podem ter contribuído negativamente para o resultado encontrado. O primeiro corresponde a precipitação pluviométrica. Entre as estações analisadas, as que mais influenciaram o trecho calibrado apresentam falhas que variam de 20 e 35%.

O segundo fator refere-se a qualidade dos dados de vazão utilizados na validação. A análise sobre a série correspondente ao período usado para validação indicou que os dados em escala diária, dos quais derivam o mensal e anual, apresentaram comportamento típico de erro. Isto porque percebeu-se que grande parte do volume, para alguns períodos, se manteve fixo por mais de 30 dias. Isto foi observado para pelo menos 30% dos meses.

Outro fator que pode ter sido determinante para o desempenho do SWAT na validação refere-se aos recorrentes fenômenos de secas que afetaram a região entre os anos de 2010 e 2013. De acordo com Arnold et al. (2012), a tentativa de calibração e validação do modelo pode ser prejudicada em casos onde a série empregada não representa bem a alternância entre estações secas e chuvosas.

Dentro os problemas citados, os relacionados a qualidade dos dados observados estão entre os principais responsáveis pela limitação de estudos com o SWAT no Brasil. Bressiani et al. (2015) pontuam que do total de trabalhos desenvolvidos no Brasil com o SWAT, cerca de 66% apresentaram sucesso na calibração e em apenas 23% dos casos foi possível validar o modelo. Entre os problemas mais comuns, destaca-se o curto período das séries históricas observadas, sejam elas climáticas e ou hidrológicas.

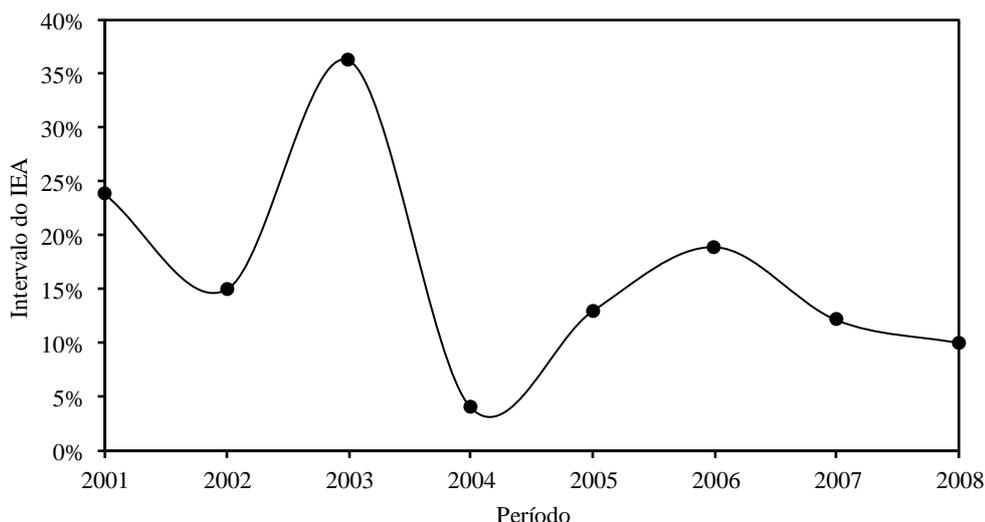
Ainda que não tenha sido possível validar o SWAT para a bacia do rio Brígida, os resultados apontam que o modelo pode ser usado para representação dos eventos hidrológicos da bacia. Isto porque o mesmo apresentou excelente desempenho na predição do período entre 2001 e 2008. Apesar do alto erro observado na validação, é possível verificar que o modelo reflete bem para a vazão a condição de escassez hídrica do período.

## 5.3 Disponibilidade hídrica

### 5.3.1 Índice de Exploração de Água

Uma primeira avaliação do quadro de disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Brígida foi realizada por meio da aplicação do Índice de Exploração de Água (IEA), ou *Water Exploitation Index* (WEI), desenvolvido pela *European Environment Agency* (EEA, 2004), o qual é exposto na Figura 16. Os intervalos percentuais podem sugerir a situação hídrica de uma determinada bacia, país ou região, a partir do quociente entre demanda e disponibilidade. Deste modo, intervalos < 5% indicam situação de excelência, 5 a 10% é referente a condição de conforto hídrico, enquanto valores entre 10 a 20% configuram-se como um quadro preocupante, 20 a 40% situação crítica e > 40% representa situação muito crítica.

Figura 16 - Índice de Exploração Hídrica (IEA) para análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Brígida.



Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com os resultados, verifica-se quadros distintos para o período analisado. As situações mais preocupantes foram identificadas entre os anos de 2001 e 2003, quando a redução da precipitação produziu um estado de limitação hídrica. O ano considerado crítico para este intervalo de temporal é o de 2003, cujo valor é de 35%. Sob estas condições, a região afetada deve, conforme o índice IEA, receber intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos estruturais, devido ao elevado risco de colapso dos sistemas de abastecimento humano.

A partir de 2004 verifica-se ligeira melhora do quadro de disponibilidade hídrica, porém o referido ano é o único em que o índice indica situação de excelência hídrica. Por outro lado,

ressalta-se que 2004 foi um ano com precipitações ligeiramente acima dos padrões comuns para a região. Este diagnóstico fica mais sólido quando analisa-se o comportamento do índice IEA entre os anos de 2005 e 2008. Para o período mencionando, a situação se mantém preocupante, requerendo intervenção por parte do poder público.

É importante salientar que entre os anos de 2001 e 2008 verificou-se na região registros pluviométricos próximos da normalidade. Isto se deve principalmente à persistente atuação da Zona de Convergência Intertropical para boa parte dos anos analisados. De acordo com Nobrega e Santiago (2014), o referido sistema é um dos principais responsáveis pela ocorrência de anos secos ou chuvosos na região. Sua influência sobre o comportamento da vazão do rio Brígida pode ser verificada a partir da análise da Tabela 8, que representa a correlação entre a vazão média anual do rio Brígida (2001 a 2008) e os índices de anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Norte (*Tropical Northern Atlantic - TNA*) e Sul (*Tropical Southern Atlantic - TSA*).

Constata-se que houve correlação entre as variáveis analisadas, onde o maior valor é verificado para o índice referente às anomalias do Atlântico Sul (TSA), ainda que sem significância estatística, em razão do reduzido número de eventos. Este resultado é de grande importância para melhor compreensão do regime pluviométrico e sua influência sobre os processos hidrológicos da bacia do Brígida. Um dos principais pontos observados diz respeito ao fato de que mesmo em anos mais favoráveis, onde as precipitações se aproximam das médias históricas, o quadro de disponibilidade de água é incompatível com a demanda. Assim, espera-se que em anos de secas moderadas ou severas, fenômeno bastante comum no semiárido brasileiro, a situação se agrave ainda mais.

Em muitas ocasiões, as ações de intervenção para contornar o referido problema são insuficientes, dada a distribuição difusa da população semiárida, assim como a ineficácia dos planos e medidas adotadas para mitigação dos efeitos, que geralmente limitam-se ao uso de caminhões pipa. Este panorama traz consigo graves implicações socioeconômicas, que afetam os grupos humanos de forma distinta, a depender dos índices de desenvolvimento humano observados na região.

Outro aspecto importante diz respeito aos eventuais problemas relacionados aos conflitos pelo uso da água na bacia hidrográfica do rio Brígida. Dentro do volume demandado para usos consuntivos na região, 75,2% é destinado apenas para a irrigação, enquanto o restante é dividido entre abastecimento urbano (11,8%), descendentação animal (5,4%), abastecimento rural (4,8%) e uso industrial (2,9%), conforme dados do Plano de Recursos Hídricos do São Francisco (PRH-SF, 2015). O gerenciamento deste quadro é um dos grandes desafios para os

gestores públicos, principalmente em uma região de menor potencial hídrico, onde a água é recurso estratégico dada a sua estrutura de desenvolvimento econômico, cujas bases são voltadas para o agronegócio.

Tabela 8 - Correlação entre a vazão média anual (2001 a 2008) da bacia hidrográfica do rio Brígida com as anomalias de Temperatura de Superfície do Mar do Atlântico Norte e Sul.

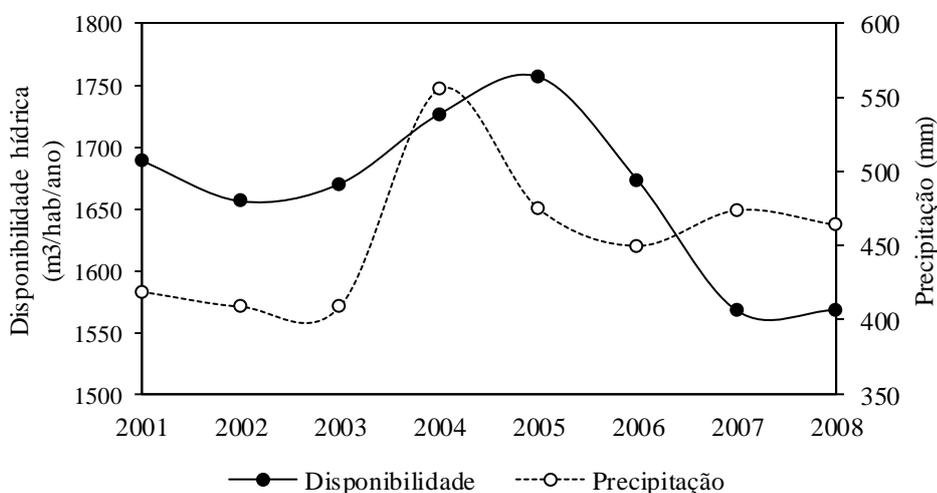
Índice	Pearson	Significância
TSA	-0,36	0,3
TNA	0,28	0,4

Fonte: elaborado pelo autor.

### 5.3.2 Disponibilidade hídrica *per capita*

Quanto a disponibilidade hídrica *per capita*, o quadro observado para o período de 2001 a 2008 é representado na Figura 17. O resultado obtido corresponde a razão entre a soma de toda a água acumulada nos reservatórios e o total de habitantes da bacia hidrográfica do rio Brígida. A classificação para diagnóstico da situação hídrica obedece a intervalos simples, propostos por Falkenmark (1989) e adotados por UNESCO (2003) para traçar o quadro mundial de disponibilidade hídrica. Neste caso, valores  $< 500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$  correspondem a situação de Escassez hídrica, entre 500 a  $1700 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$  à situação de Estresse hídrico, enquanto valores  $> 1700 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$  referem-se situação de Conforto hídrico.

Figura 17 - Disponibilidade hídrica per capita da bacia hidrográfica do rio Brígida entre os anos de 2001 e 2008, estimada a partir do cociente entre a média anual de água armazenada nos principais reservatórios presentes na bacia e o número de habitantes.



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar que a variação da disponibilidade hídrica por habitante é influenciada pela curva da precipitação. Por outro lado, para algumas datas, especificamente, observa-se ligeira mudança neste padrão, principalmente para os anos de 2005, 2007 e 2008. Em relação ao ano de 2005, mesmo com a queda no volume de precipitação, há um pequeno aumento da disponibilidade de água *per capita*, um incremento na ordem de 50 m<sup>3</sup>/hab/ano em relação a 2004, ano que apresentou maior volume de precipitações. Como a precipitação esteve próxima da normalidade em 2005, cerca de 480 mm, a existência de água nos sistemas de armazenamento favoreceu maior acúmulo de água para este período.

Quanto aos anos de 2007 e 2008, apesar do aumento da precipitação pluviométrica em relação a 2006, houve declínio da disponibilidade de água *per capita*. Isto se deve principalmente ao aumento do contingente populacional projetado pelo IBGE para o ano de 2007, quando o total de habitantes passou de 388 mil para 416 mil, um incremento de 7,1%.

Em relação ao quadro geral de disponibilidade hídrica, verifica-se que apenas os anos de 2004 e 2005 podem ser classificados como situação de Conforto Hídrico. Para os demais anos, que representam 75% da série analisada, o quadro observado é de estresse hídrico, para os quais os piores cenários são verificados para os anos de 2007 e 2008, justamente pelo aumento da demanda hídrica decorrente da mudança positiva na demografia.

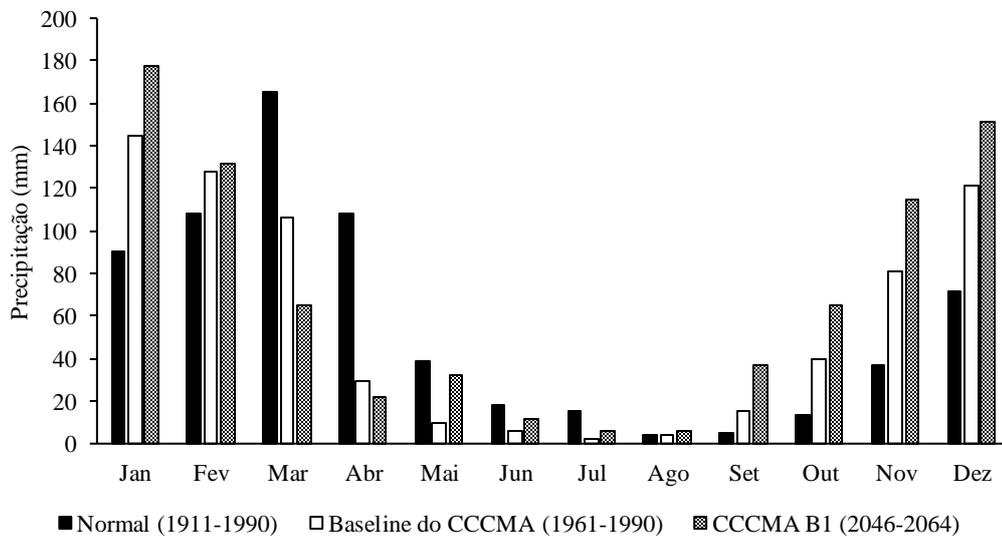
O resultado apresentado reflete bem a realidade do quadro de disponibilidade hídrica nas bacias semiáridas. As variações se devem principalmente às alternâncias entre anos chuvosos e secos, fenômeno que associado ao crescimento da população contribui de forma decisiva para os mais variados problemas ambientais observados no Semiárido, como perdas de vidas humanas, migrações, prejuízos socioeconômicos, entre outros.

## **5.4 Disponibilidade hídrica frente aos cenários de mudanças climáticas e demográficas**

### **5.4.1 Projeção da Precipitação pluviométrica**

A Figura 18 expõe a média mensal dos totais pluviométricos para a bacia hidrográfica do rio Brígida, baseada na normal climatológica observada de 1961 a 1991, assim como o *baseline* modelado pelo modelo climático global CCCMA (1961-2000) e o cenário futuro B1 (2046-2064), este considerado mais moderado. É possível observar que o modelo consegue detectar bem o padrão de distribuição da precipitação ao longo do ano, com chuvas concentradas entre os meses de novembro a abril, período considerado chuvoso.

Figura 18 - Padrão da precipitação pluviométrica mensal da bacia hidrográfica do rio Brígida, com base na atual normal climatológica (1961-1991), baseline modelado pelo CCCMA (1961-1991) e projeção para o período de 2046 a 2064.



Fonte: elaborado pelo autor

Na comparação entre *baseline* e a normal observada para o cenário atual, obteve-se  $R^2 = 0,69$ . O volume de precipitação para a pré-estação chuvosa e estação chuvosa é superestimado para a maioria dos meses, sendo março e abril as únicas exceções, para os quais constata-se subestimativa, com diferença de cerca de 60 e 70 mm, respectivamente.

Nos meses que correspondem ao período de estiagem, os valores encontram-se mais próximos. Entretanto, entre maio e agosto, o CCCMA subestima o volume precipitado em relação a normal observada. Este padrão de resposta do CCCMA para o Nordeste foi detectado anteriormente em outros estudos semelhantes, como os conduzidos por Marengo (2006). O autor constatou que o modelo superestima principalmente o volume de chuvas durante a transição da primavera para a pré-estação chuvosa.

Quanto ao cenário projetado entre 2046 e 2064, quando são esperadas mudanças mais significativas, observa-se que o CCCMA representa condições de aumento da umidade durante o período chuvoso e maior aridez na estação seca, quando comparado a normal histórica observada. Por outro lado, as maiores mudanças em relação ao volume precipitado são para o período de chuvas, entre novembro e abril, para o qual verifica-se incremento da precipitação. Para a estação seca, a redução no volume se concentram nos meses iniciais.

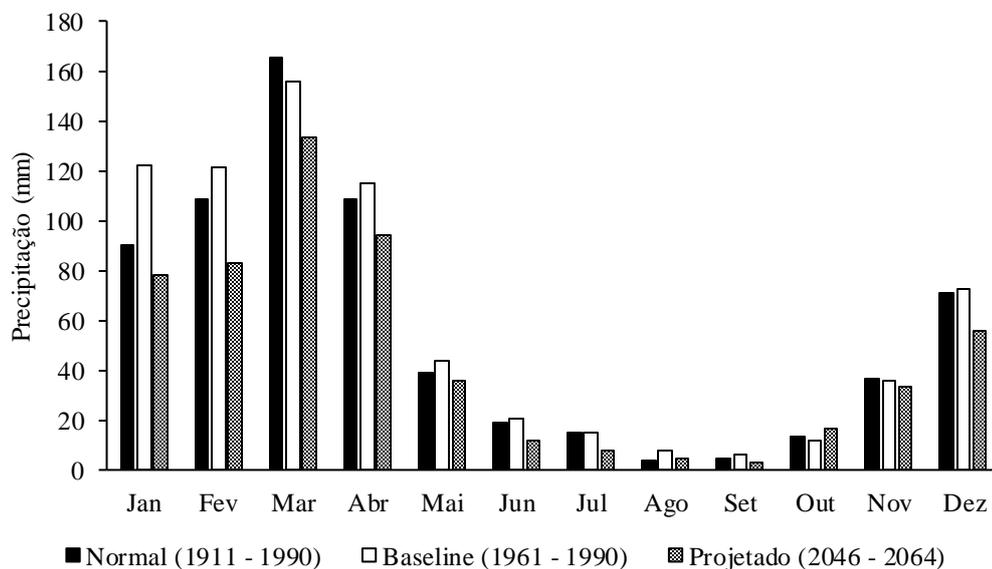
De modo geral, o cenário B1 do modelo CCCMA projeta incremento no volume de precipitação na ordem de 21%. Este resultado contraria alguns prognósticos para a região, a maioria deles baseados nos últimos relatórios do IPCC (2007) e IPCC (2013), que apontam tendência de aumento sistemático das temperaturas e provável redução das chuvas. Por outro

lado, se alinham com resultados encontrados por Marengo (2006), que investigou um período semelhante e encontrou uma tendência de incremento na ordem de 3 mm por dia. Vale ressaltar que o CCCMA não foi o único a apresentar este resultado nas análises do referido autor. O mesmo também ocorreu com GFDL, que projetou um aumento médio diário de até 2,5 mm para o cenário A2, considero mais extremo.

Em linhas gerais, salienta-se que o CCCMA apresenta baixo erro da estimativa geral (1,9%) do seu *baseline* em relação ao dado observado. Porém, evidenciam-se grandes diferenças quando se considera a simulação mês a mês. Deste modo, a alternância entre superestimava e subestimativa ao longo do ano colaboraram para o resultado final, mascarando o erro relativo para os prognósticos mensais.

Outro modelo empregado para projeção da precipitação na bacia hidrográfica do rio Brígida foi o MIROC, que respondeu de maneira diferente do CCCMA. Os resultados para o mesmo período e cenário (B1), são expostos na Figura 19. A comparação entre o *baseline* do modelo com a normal climatológica observada para a bacia revela que o padrão de chuvas detectado pelo MIROC é bastante semelhante ao atual, com  $R^2 = 0,98$ .

Figura 19 - Padrão da precipitação pluviométrica mensal da bacia hidrográfica do rio Brígida, com base na atual normal climatológica (1961-1991), *baseline* modelado pelo MIROC (1961-1991) e projeção para o período de 2046 a 2064.



Fonte: elaborado pelo autor.

As maiores diferenças são observadas período entre janeiro e abril. Para os dois primeiros meses do ano, verifica-se que o modelo superestima a precipitação, assim como o CCCMA, enquanto subestima em março e volta a superestimar em abril. A partir de maio, início

da estação seca, e dezembro, primeiro mês da pré-estação chuvosa, os valores referentes ao volume observado e simulado se encontram mais próximos. Ainda assim, verifica-se que o volume de chuva simulado mês a mês pelo MIROC ultrapassa ligeiramente o observado. Em relação a estimativa geral, o erro médio foi de 7,7%.

No que se refere ao cenário futuro, o MIROC não projeta mudanças no padrão de precipitação pluvial mensal da bacia do rio Brígida. Dentro do período chuvoso, por exemplo, o mês com maior volume de chuvas continua sendo março, enquanto para estação seca, as menores taxas de precipitação são observadas para os meses de agosto e setembro, como ocorre atualmente.

Chama atenção a redução sistemática da precipitação para a maior parte do período analisado. Os únicos meses para os quais o MIROC não projeta redução da precipitação são agosto e outubro, porém, com diferenças mínimas. As maiores variações negativas da precipitação em relação ao observado são justamente para a estação chuvosa. Uma análise referente ao período chuvoso propriamente dito, ou seja, sem que se considere a pré-estação chuvosa, revela uma redução que varia de 12 a 23%. Para o período de transição do seco para o úmido, o declínio oscila entre 9 e 21,3%.

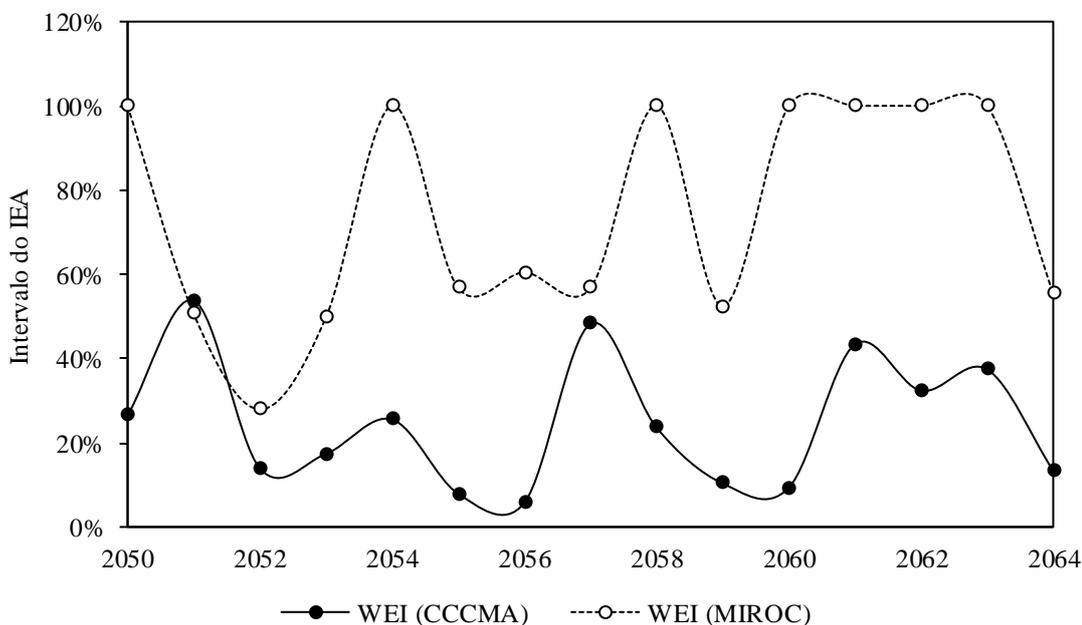
As divergências observadas entre os resultados encontrados para os cenários de precipitação pluviométrica simulados pelos modelos CCCMA e MIROC podem ter origem nas suas estruturas conceituais e características técnicas. O CCCMA, por exemplo, possui resolução oceânica de  $1,8^\circ \times 1,8^\circ$  e 29 níveis verticais, enquanto o MIROC apresenta resolução de  $0,5^\circ - 1,4^\circ \times 1,4^\circ$  e 47 níveis verticais. As maiores diferenças dizem respeito a inclusão e dinamização de algumas variáveis. No CCCMA a forçamento solar é constante, enquanto no MIROC ele é variável. Outro ponto importante diz respeito aos gases emitidos para a atmosfera. Diferentemente do CCCMA, o MIROC inclui em suas simulações os efeitos de gases estufa e aerossóis de sulfatos.

O melhor desempenho do MIROC para simulação do comportamento da precipitação para a segunda metade do século XX pode estar atrelado ao maior detalhamento do padrão termodinâmico dos oceanos, assim como a oscilação da radiação e inclusão de gases estufa. Os resultados encontrados, quando comparados ao do CCCMA, indicam que o mesmo parece mais confiável em relação às projeções, devido a melhor resposta para o *baseline*. Por outro lado, é importante ressaltar que a simulação da precipitação pluvial ainda é um dos grandes desafios na modelagem climática. Em muitas situações, os modelos têm apresentado graves limitações, sobretudo na construção de cenários futuros.

#### 5.4.2 Projeção do Índice de Exploração de Água

A Figura 20 representa o resumo dos resultados obtidos a partir da aplicação do IEA na vazão bacia do rio Brígida. Para esta análise, considerou-se possíveis cenários climáticos modelados a partir do abastecimento do SWAT com dados climatológicos do CCCMA e MIROC. Também foram utilizadas informações relacionadas ao provável incremento na demanda hídrica futura, dado obtido junto ao relatório do Comitê de Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (PRH-SF, 2015).

Figura 20 - Índice de Exploração de Água na bacia hidrográfica do rio Brígida, com base em cenários climáticos dos modelos CCCMA e MIROC e projeção da demanda hídrica.



Fonte: elaborado pelo autor.

A comparação entre os resultados gerados a partir dos dois modelos empregados sugere que há certa semelhança na variação do índice, embora com valores percentuais absolutos bem diferentes. Isto fica mais evidente para os anos entre 2061 e 2064, quando evidencia-se maior semelhança, com os dois modelos apontando piora do quadro de disponibilidade hídrica, o qual é classificado como preocupante para a curva representativa do CCCMA e Crítica para o modelado a partir do MIROC.

No que se refere a resposta do CCCMA, que projeta incremento na precipitação pluvial, verificam-se variações na situação hídrica da bacia ao longo do período analisado, padrão que provavelmente encontra-se relacionado a alternância entre os anos secos e úmidos no Semiárido, fenômeno comum no e aparentemente bem representado pelo modelo. Observa-se

que os anos de 2055 e 2056, assim como 2059 e 2060, são os únicos para os quais a situação ainda é de excelência ou conforto hídrico, uma vez que o intervalo percentual varia entre 6 e 10%. Os demais anos são enquadrados como de Situação Preocupante (> 10%), a qual requer intervenção estrutural, e Crítica (> 40%), que demanda gerenciamento imediato.

Ainda que o CCCMA tenha projetado aumento da precipitação pluvial para o período, principalmente para a estação chuvosa, verifica-se que o quadro geral da bacia, caso se confirmem estes prognósticos, é muito preocupante. Isto se deve principalmente ao aumento da demanda hídrica, que deve passar dos 3,6 m<sup>3</sup>/s atuais, para 4,07 m<sup>3</sup>/s até o ano de 2025, segundo PRH-SF, (2015). É importante ressaltar que estas são projeções consideradas otimistas, visto que a demanda de água para usos consuntivos pode ser ainda maior até o ano de 2064.

Quanto ao cenário projetado pelo modelo MIROC, este é ainda mais alarmante, já que a redução da precipitação é acompanhada do aumento da demanda hídrica. Constatou-se que em pelo menos 46% do tempo, o IEA alcança seu valor máximo adotado no presente estudo, que é de 100%. O valor mínimo encontrado para a série, cerca de 20%, é verificado para o ano de 2052, porém, o referido valor percentil refere-se à uma situação Preocupante. Deste modo, em 94% da série analisada, a situação é crítica e exige intervenção imediata, com grandes investimentos em obras estruturais de emergência.

É preciso considerar que a presença de um conjunto de reservatórios na região interfere de maneira significativa na vazão do rio Brígida. Outro ponto importante refere-se ao real aumento de disponibilidade hídrica proporcionado por essas estruturas, que são capazes de armazenar grandes quantidades de água ao longo dos anos, contraponto fundamental em rios intermitentes, dominantes no Semiárido.

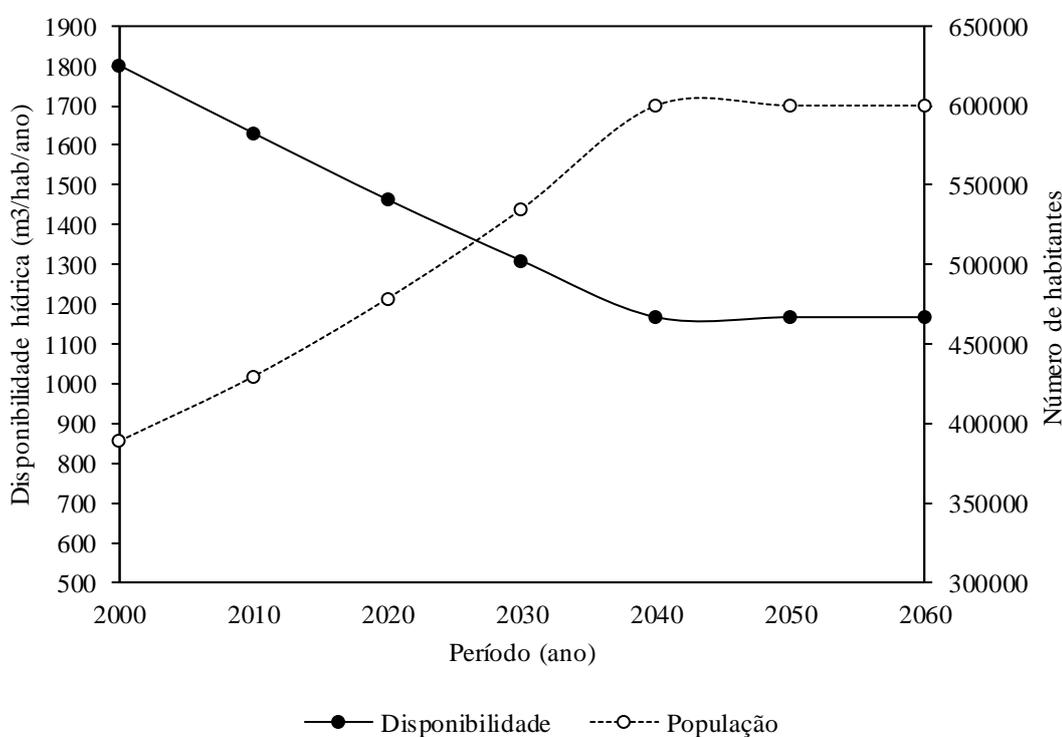
Por outro lado, os municípios que se encontram à jusante das referidas estruturas são bastante afetados pelo aumento da escassez hídrica, já que a exploração deste recurso, em muitas situações, está diretamente ligada ao quantitativo de água disponível nos canais, uma vez que muitos grupos populacionais estão distribuídos de forma difusa no território.

De modo geral, o gerenciamento dos recursos hídricos é um dos grandes desafios para os gestores públicos, isto ainda sem que se considere as questões relacionadas às mudanças climáticas. Os resultados apresentados sugerem que mesmo em condições climáticas mais favoráveis, o cenário não é nada animador. Isto pode agravar-se ainda mais caso se confirmem as projeções realizadas a partir do modelo climático MIROC.

#### 5.4.2 Projeção da Disponibilidade Hídrica *Per capita*

A projeção do quadro de disponibilidade hídrica *per capita* para a bacia do rio Brígida encontra-se exposta na Figura 21. Em um primeiro momento, levou-se em consideração apenas o possível cenário de crescimento populacional e manutenção da atual infraestrutura e padrão climático. A estimativa se trata de uma disponibilidade hídrica potencial, calculada a partir da razão entre a soma da capacidade total de acumulação dos reservatórios modelados e o total de habitantes para o período de 2000 a 2060.

Figura 21 - Projeção da disponibilidade hídrica *per capita*, calculada a partir da razão a soma da capacidade máxima de armazenamento dos principais reservatórios inseridos na bacia hidrográfica do rio Brígida e total de habitantes por década.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ressalta-se que as projeções populacionais são baseadas nas atuais taxas de crescimento por município. Outro ponto importante diz respeito a estabilização e declínio do contingente populacional a partir de 2043, segundo estimativas da ONU e IBGE. Diante da impossibilidade técnica de representar esta tendência, dada a limitação de dados, a população é considerada estável entre 2040 e 2060. Este padrão não foge necessariamente aos prognósticos futuros, uma vez que espera-se certa estagnação ou pequenas variações negativas no contingente populacional para primeiras décadas da segunda metade do século XXI.

Entre os anos 2000 e 2010, quando o cálculo da disponibilidade hídrica ainda é baseado nos registros populacionais dos censos do IBGE (2000; 2010), observa-se um decréscimo do quantitativo de água por habitante. Esta redução expõe a população, pela primeira vez após construção de todos os reservatórios modelados, a um quadro de escassez hídrica permanente, uma vez que em 2010 a quantidade de água por habitante poderia alcançar no máximo 1616 m<sup>3</sup>/hab/ano, taxa inferior ao mínimo recomendado por UNESCO (2003), que é >1700 m<sup>3</sup>/hab/ano. Para este período, a população passou de 388.979 em 2000, para 429.685 em 2010, um crescimento na ordem de 10,4%.

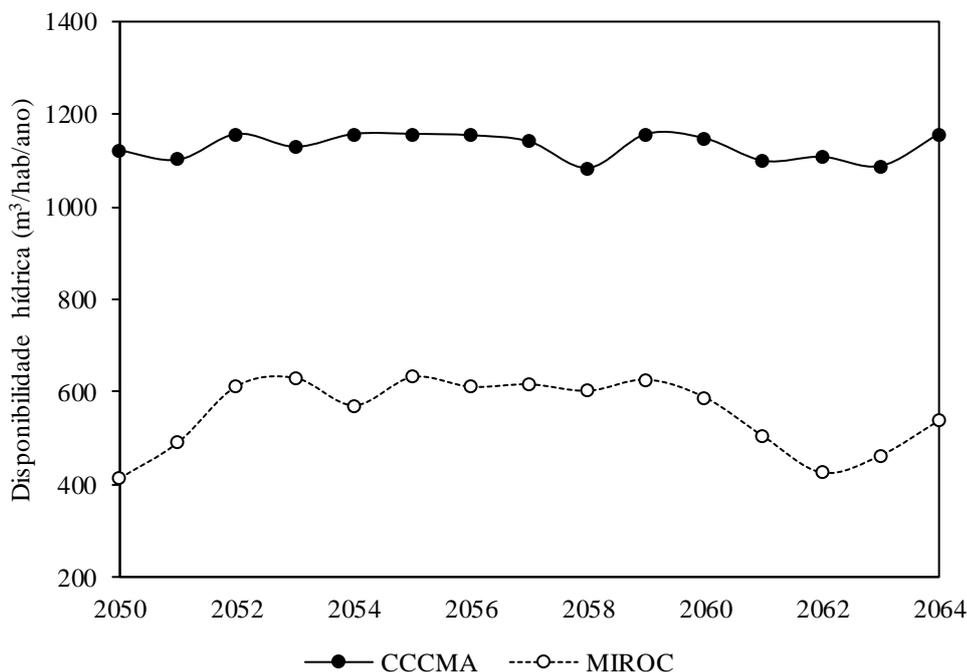
A tendência de diminuição da disponibilidade de água por habitante se mantém até 2040 em função da manutenção do crescimento geométrico da população. A partir de então, há uma estabilização do potencial de disponibilidade de água na região, que, segundo as estimativas, girará em torno de 1100 m<sup>3</sup>/hab/ano, se todos os reservatórios atingirem capacidade máxima. Este limiar, segundo classificação adotada por UNESCO (2003) é enquadrado como situação de estresse hídrico.

Como pode ser constatado a partir dos resultados encontrados, as atuais estruturas construídas para garantir o acesso à água para a população inserida na bacia hidrográfica do rio Brígida, não atendem de maneira adequada à demanda. Isto porque a maior parte dos empreendimentos foram construídos para dar resposta a um determinado grau de demanda hídrica das décadas de 1970, 1980 e 1990, quando maior parte das bacias hidráulicas foram construídas.

Diante da variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Semiárido, assim como intenso uso da água para irrigação e setor industrial, é possível concluir que a população encontra-se altamente vulnerável aos eventos extremos de seca. Caso não seja posto em prática um plano adequado de gerenciamento dos recursos hídricos, o quadro tende a agrava-se ainda mais, isto já para o ano de 2020, período que segundo Ahmed et al. (2015) coincide com as projeções globais da ONU.

Quando passa-se a considerar nas projeções os possíveis cenários climáticos futuros, as perspectivas não são nada otimistas, mesmo para condições, aparentemente, mais favoráveis. Isto pode ser verificado a partir da observação da Figura 22, que exhibe o quadro de disponibilidade hídrica da bacia do rio Brígida conforme dados projetados pelos modelos climáticos CCCMA e MIROC. Salienta-se que para estas projeções também são empregadas as mudanças demográficas.

Figura 22 - Disponibilidade hídrica *per capita* na bacia hidrográfica do rio Brígida, com base na projeção da população e cenários climáticos projetados pelos modelos climatológicos CCCMA e MIROC.



Fonte: elaborado pelo autor.

A observação sobre os dois cenários projetados pelos modelos indica que o padrão de variação temporal é semelhante, embora o volume bruto disponível, assim como a situação hídrica, seja completamente diferente. No que se refere ao projetado a partir da modelagem do CCCMA, verifica-se que o quadro de disponibilidade hídrica *per capita* varia entre 1000 e 1200 m³/hab/ano. O menor valor de disponibilidade é verificado para o ano de 2058 (1083 m³/hab/ano), enquanto os maiores volumes foram verificados para 2052 e 2064, ambos com 1157 m³/hab/ano.

Reforça-se que o modelo climático CCCMA projetou aumento sistemático da precipitação pluviométrica. Por outro lado, mesmo com a tendência de um quadro favorável, a situação hídrica da população ainda é de Estresse Hídrico para toda a série analisada. A configuração deste resultado está atrelada ao crescimento do contingente populacional projetado, assim como a estagnação da infraestrutura hidráulica da bacia, que atualmente não atende ao mínimo exigido.

Quanto ao cenário modelado a partir dos dados do MIROC, estes são ainda mais preocupantes. Observa-se que o limiar de disponibilidade hídrica para este cenário varia entre 400 e 600 m³/hab/ano. Os primeiros anos da década de 2050 estão entre os que refletem um quadro mais grave. Neste período, o total de habitantes na bacia é de 600 mil habitantes, 39,6%

superior ao contingente atual. A situação hídrica da população para este cenário, com manutenção da atual infraestrutura e uso e cobertura da terra, é de Escassez Hídrica.

A condição apresenta uma ligeira melhora a partir de 2052, quando a curva da disponibilidade ultrapassa 500 m<sup>3</sup>/hab/ano e se mantém até assim até 2060, expondo a população a uma situação de Estresse Hídrico. Nos anos finais, verifica-se piora da situação, amenizada apenas no último ano da série.

Como pontuado anteriormente, as previsões de disponibilidade hídrica baseadas nos cenários climáticos do MIROC estão mais alinhadas com os resultados encontrados pelo IPCC (2013). Seu bom desempenho para a simulação do clima atual também o coloca em vantagem em relação ao modelado pelo CCCMA, reforçando a importância dos resultados encontrados.

De modo geral, os resultados sugerem que o gerenciamento dos recursos hídricos na região é ainda mais complexo do que vem se discutindo no meio científico e veículos de informação. Observa-se que as mudanças demográficas e manutenção da atual infraestrutura produzem impactos de grandes proporções sobre a disponibilidade hídrica. Impactos estes que não são menos graves que as mudanças climáticas, que surgem na verdade como possível agravante do problema.

O quadro exposto não leva em consideração os vários tipos de usos consuntivos da água na bacia do rio Brígida, nem o fato de alguns dos reservatórios terem suas águas destinadas exclusivamente a irrigação. Segundo dados do PRH-SF (2015), pelo menos 80% da água utilizada para usos consuntivos na bacia são destinadas ao setor agrícola e industrial. Assim, o quantitativo de água por habitante pode ser ainda menor do que o estimado para cenário atual e futuro.

O próprio projeto de transposição das águas do rio São Francisco, criado para dar uma resposta ao problema, precisa enquadrar-se a esta realidade. Isto porque o referido rio também deve sofrer com os efeitos das mudanças ambientais. Assim, a simples integração entre bacias não pode ser vista como solução suprema para um problema amplo, que envolve fatores sociais e naturais.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação ao mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Brígida, as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas no presente estudo se mostraram bastante eficientes. A partir referido mecanismo, pôde-se detectar quatro categorias de uso e cobertura, as quais resultam da atuação de forças naturais (Floresta Estacional Decidual e Savana Estépica), assim como as decorrentes das ações sociais (Agricultura de Sequeiro e Agricultura Irrigada). Para os recursos hídricos, este atributo é de suma importância, pois corresponde à uma das etapas principais referentes ao ciclo hidrológico. Desse modo, na referida unidade ambiental predomina a Savana Estépica que, relacionada à Agricultura de Sequeiro, representam as classes que exercem maior controle sobre a dinâmica de interceptação da água da chuva, infiltração e escoamento superficial.

Quanto a calibração do modelo SWAT, os três métodos estatísticos empregados para avaliação de seu desempenho, em escala anual, demonstraram resultados positivos. A estimativa da vazão realizada pelo SWAT está muito próxima ao que foi observado. Verifica-se que o modelo conseguiu detectar bem todas as variações do fluxo, embora com subestimativa para os anos de 2003 e 2004 e superestimava para os demais. Na etapa de validação, vários fatores pesaram contra, entre os quais, a qualidade dos dados e a recorrência de secas tiveram maior peso. Por outro lado, o volume de vazão observado está dentro de um limiar ( $0 - 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ), para o qual o SWAT encontrou grandes dificuldades de representação. Apesar do mau desempenho na validação, o modelo conseguiu prever a vazão em pelo menos 48% do período observado, perdendo eficiência nas pequenas variações. Avaliando todas as variáveis que pesaram no desempenho do SWAT para simulação da vazão da bacia do rio Brígida, é possível concluir que o mesmo pode ser utilizado para o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos na bacia estudada.

Os resultados encontrados a partir da aplicação do IEA para o período de 2001 a 2008, empregado na calibração do modelo, indicam que a situação hídrica na bacia varia de preocupante a crítica ao longo do período analisado. Este quadro é reflexo da variabilidade temporal e espacial das chuvas no Semiárido, comportamento que afeta o regime hidrológico da bacia. Deste modo, é preciso que se leve em consideração que as intervenções necessárias para gerenciamento dos recursos hídricos na região devem considerar tais aspectos.

Quanto aos cenários climáticos futuros, os modelos empregados nas simulações da precipitação pluviométrica modelaram cenários divergentes. Por outro lado, a comparação entre os resultados obtidos para a simulação do clima atual revela que em comparação ao CCCMA,

o MIROC produziu melhores resultados. Este dado se deve principalmente à estrutura técnica e conceitual de cada um dos modelos. Diferenças que recaem principalmente sobre a resolução oceânica, variação da energia solar e consideração dos efeitos dos gases estufa, que aparentemente pesaram a favor do MIROC.

Em relação ao quadro de disponibilidade hídrica *per capita* futuro, verificou-se situação preocupante, seja considerando os efeitos do clima ou não. A primeira avaliação realizada em cima do crescimento populacional constata que as estruturas construídas para garantir o acesso à água na região são obsoletas diante da demanda atual. Deste modo, o crescimento populacional projetado em cima de um modelo simples, ao nível de município, tende a agravar geometricamente uma situação já considerada insustentável do ponto de vista técnico e estrutural.

Quando insere-se nas simulações os cenários climáticos futuros, há uma tendência de piora da situação. Mesmo para o cenário mais favorável, como o modelado com base no CCCMA, verifica-se redução drástica da disponibilidade hídrica *per capita*, situação que reflete principalmente pela mudança na demografia e estagnação da infraestrutura. Quanto ao modelado a partir do MIROC, este é ainda mais preocupante, visto que pela primeira vez nas análises, verifica-se quadros de escassez hídrica na bacia.

Diante dos resultados apresentados, verifica-se que o quadro de disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Brígida acende um alerta para os possíveis conflitos pelo uso da água na região. A combinação mudanças climáticas e crescimento populacional pode ser decisiva para o agravamento de uma situação já preocupante. Vale ressaltar que não se inseriu nas discussões os possíveis impactos decorrentes das mudanças no uso e cobertura da terra, que podem agravar ainda mais a situação. Neste sentido, faz-se necessário a continuidade de outros estudos complementares, assim como a adoção de políticas públicas emergenciais para monitoramento e gerenciamento das bacias hidrográficas semiáridas.

## REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. et al. 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.
- ABBURU, S.; GOLLA, B. S. Satellite image classification methods and techniques: a review. **International Journal of Computer Applications**, v. 119, n. 8, p. 20 - 25, 2015.
- ABDALLA, M. et al. Simulating the impacts of land use in Northwest Europe on Net Ecosystem Exchange (NEE): The role of arable ecosystems, grasslands and forest plantations in climate change mitigation. **Science of the Total Environment**, v. 465, p. 325–336, 2013.
- ALBUQUERQUE F. N. B.; COSTA J. S.; Rainfall interception in different physiognomies of caatinga. **Geografia Ensino & Pesquisa** v. 16, p. 63–75, 2012.
- AHMED, Y. et al. **Assessment of the relation between water quality and water quantity for international metropolitan cities**. World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems. **Anais...Austin: 2015** Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84935142104&partnerID=40&md5=bd6a8fd45f267f0a08bbce38cd9d3f05>>
- AKHAVAN, S. et al. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 139, n. 4, p. 675–688, 2010.
- ALBUQUERQUE, F.N.B.; COSTA, J.S. Interceptação de chuva em diferentes fisionomias de caatinga (Coreaú, CE). **Geografia Ensino & Pesquisa**, 16, (3) 2012.
- ALCAMO, J.; HENRICHS, T.; RÖSCH, T. **World Water in 2025 - Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century**Kassel **World Water Series 2**. p. 47, 2000.
- ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3, p. 337–350, 2010.
- APAC. **Bacias Hidrográficas**. Disponível em: <[http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page\\_id=5&subpage\\_id=13](http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=13)>. Acesso em: 4 abr. 2016.
- ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- ARNOLD, J. G. et al. **Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. version 2012**Texas Water Resources Institute, **TR-439**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>>.
- ASSIS, J.M.O. ; SOUZA, W.M. ; SOBRAL, M. C. M. . CLIMATE ANALYSIS OF THE RAINFALL IN THE LOWER-MIDDLE STRETCH OF THE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN BASED ON THE RAIN ANOMALY INDEX. **Revista Brasileira de Ciências**

**Ambientais** (Online), v. 2, p. 188-202, 2015.

AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, F. D. DOS S. Risco climático para o cultivo do algodoeiro na região nordeste do Brasil. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 22, n. 3, p. 408–416, 2007.

AYOADE, J. O. 2003. **Introdução à climatologia para os trópicos**. (9ed.) Trad. Maria Juraci Zani dos Santos. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro-Brasil. 332 p.

BATES, B.; ZBIGNIEW W. K.; WU, S.; PALUTIKOF, J. **El Cambio Climático y el Agua**. Secretaría del IPCC: Ginebra, 2008.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 100–111, 2013.

BARROS, I. O.; SOARES, A. A. Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro e velame da caatinga brasileira. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 44, n. 1, p. 192–198, 2013.

BEKELE, E. G.; NICKLOW, J. W. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II. **Journal of Hydrology**, v. 341, n. 3–4, p. 165–176, 2007.

BELTRÃO, V. A., LAMOUR, C. Uso atual e potencial dos solos do Nordeste. Projeto Nordeste 6, SUDENE. Recife, 1985.

BEVEN, K. Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 17, p. 3447–3460, 2004.

BIRADAR, C. M. et al. A global map of rainfed cropland areas (GMRCA) at the end of last millennium using remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, n. 2, p. 114–129, 2009.

BOSSIO, D.; GEHEB, K.; CRITCHLEY, W. Managing water by managing land: Addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 536–542, 2010.

BROOKS, E. B. et al. On-the-fly massively multitemporal change detection using statistical quality control charts and landsat data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 6, p. 3316–3332, 2014.

BRUNET, R.; FERRAS, R. **Les monts de la Geographie: dictionnaire critique**. 2ed. 2reim ed. [s.l: s.n.].

CATEN, A.; MINELLA, J. P. G.; MADRUGA, P. R. D. A. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo Disintensification of land use and its relation with soil erosion. p. 1006–1014, 2012.

CHAGAS, C. S. et al. Utilização de redes neurais artificiais na classificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 319–327, 2009.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 2. ed. São Paulo: 2004, 2004.

CLARK, M. L. et al. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2816–2832, 2010.

COELHO, V. H. R. et al. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 64–72, 2014.

COSTA, I. R. DA; ARAÚJO, F. S. DE; LIMA-VERDE, L. W. Flora e aspectos auto-ecológicos de um enclave de cerrado na chapada do Araripe, Nordeste do Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 4, p. 759–770, 2004.

CROWLEY, T. J.; NORTH, G. R. Abrupt climate change and extinction events in Earth history. **Science**, v. 240, n. 4855, p. 996–1002, 1988.

CUNHA, J. E. B. L. et al. Dynamics of vegetal cover for São João do Rio do Peixe Basin (Paraíba) using remote sensing | Dinâmica da cobertura vegetal para a bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 539–548, 2012.

DAVIES, E. G. R.; SIMONOVIC, S. P. Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system. **Advances in Water Resources**, v. 34, n. 6, p. 684–700, 2011.

AMORIM, I. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, E. L. Phenology of woody species in the caatinga of Seridã<sup>3</sup>, RN, Brazil. **Fenologia de espécies lenhosas da caatinga do Seridã<sup>3</sup>, RN**, v. 33, n. 3, p. 491–499, 2009.

DORAIS, A.; CARDILLE, J. Strategies for incorporating high-resolution google earth databases to guide and validate classifications: Understanding deforestation in Borneo. **Remote Sensing**, v. 3, n. 6, p. 1157–1176, 2011.

FAO, UNEP, 1999. Terminology for Integrated Resources Planning and Management, Food and Agriculture Organization/United Nations Environmental Programme, Rome, Italy/Nairobi, Kenya.

FALKENMARK, F. The massive water scarcity threatening Africa-why isn't it being addressed., **Ambio**, 18, (2), 1989, P.112-118.

FARAMARZI, M. et al. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 85–101, 2013.

FERNANDES, J. G. **Estimativa De Vazão e Produção de Sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

FERREIRA, P. D. S. et al. Mudanças climáticas e a Geopotencialidade à fruticultura em municípios de Pernambuco: subsídios à agricultura familiar. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 46, p. 522, 2016.

FRITZ, S. et al. Geo-wiki.org: The use of crowdsourcing to improve global land cover. **Remote Sensing**, v. 1, n. 3, p. 345–354, 2009.

FEYEREISEN, G. et al. Evaluation of Swat Manual Calibration and Input Parameter Sensitivity in the Little River Watershed. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 2002, p. 843–855, 2007.

GALLANT, A., KAROLY, D. and GLEASON, K. Consistent trends in modified climate extremes index in the U.S.A., Europe and Australia. **Journal of Climate**, 27, 1379–1394, 2014.

GALVÍNCIO, J.D et al. LAI Improved to Dry Forest in Semiarid of the Brazil. **International Journal of Remote Sensing Application**, v. 3, n. 4, p. 193, 2013.

GEOFFROY, O. et al. Transient climate response in a two-layer energy-balance model. Part I: Analytical solution and parameter calibration using CMIP5 AOGCM experiments. **Journal of Climate**, v. 26, n. 6, p. 1841–1857, 2013.

GONZÁLEZ-DUGO, M. P. et al. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. **Agricultural Water Management**, v. 125, p. 92–104, 2013.

GALVÍNCIO, J.D et al. LAI Improved to Dry Forest in Semiarid of the Brazil. **International Journal of Remote Sensing Application**, v. 3, n. 4, p. 193, 2013.

HANSEN, M. C. et al. Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with Web-Enabled Landsat Data (WELD). **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 466–484, 2014.

HAVAUX, M. Stress Tolerance of Photosystem II in Vivo: Antagonistic Effects of Water, Heat, and Photoinhibition Stresses. **Plant physiology**, v. 100, n. 1, p. 424–432, set. 1992.

HEISTERMANN, M.; MÜLLER, C.; RONNEBERGER, K. Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 114, n. 2–4, p. 141–158, 2006.

HUANG, C. et al. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 1, p. 183–198, 2010.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>>.

IBGE. **Censo demográfico 2010 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.**, 2010.

IPCC. **Climate Change 2007**. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, 2007. 123p.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 1535p.

JACOBSON, A. et al. A novel approach to mapping land conversion using Google Earth with an application to East Africa. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 1–9, 2015.

JIANG, J. H. et al. Evaluation of cloud and water vapor simulations in CMIP5 climate models Using NASA “A-Train” satellite observations. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 14, 2012.

Jones RG, Noguer M, Hassell DC, Hudson D, Wilson SS, Jenkins GJ, Mitchell JFB (2004) Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK

JOLY, C. A. 2007. Biodiversidade e mudanças climáticas: contexto evolutivo, histórico e político. VIII Congresso de Ecologia do Brasil. Caxambu-Brasil (23-28 de Setembro).

KANNAN, N.; SANTHI, C.; ARNOLD, J. G. Development of an automated procedure for estimation of the spatial variation of runoff in large river basins. **Journal of Hydrology**, v. 359, n. 1–2, p. 1–15, 2008.

KENNEDY, R. E.; COHEN, W. B.; SCHROEDER, T. A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, n. 3, p. 370–386, 2007.

KOIRALA, S. R.; GENTRY, R. W. SWAT and Wavelet Analysis for Understanding the Climate Change Impact on Hydrologic Response. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 2, n. April, p. 41–48, 2012.

LEGESSE, D.; VALLET-COULOMB, C.; GASSE, F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: Case study south central Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 275, n. 1–2, p. 67–85, 2003.

LELIS, T. A. et al. Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 623–634, 2012.

LI, Q.; ISHIDAIRA, H. Development of a biosphere hydrological model considering vegetation dynamics and its evaluation at basin scale under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 412–413, p. 3–13, 2012.

LI, Z. et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 35–42, 2009.

LOPES, H. L. et al. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do

solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1210–1219, 2010.

LÓPEZ-MORENO, J. I. et al. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. **Science of the Total Environment**, v. 493, p. 1222–1231, 2014.

LOVELAND, T. R.; DWYER, J. L. Landsat: Building a strong future. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, n. October 2000, p. 22–29, 2012.

MACALISTER, C.; MAHAXAY, M. Mapping wetlands in the Lower Mekong Basin for wetland resource and conservation management using Landsat ETM images and field survey data. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 7, p. 2130–2137, 2009.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31–44, 2015.

MA, Z. et al., Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China. **Journal of Hydrology**. v.352, p.239-249, 2008.

MELLO, C. R. DE et al. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. v. 40, n. 1, p. 7–25, 2016.

MELO, E. C. DE S.; MELO, A. S. DE; SOUSA, E. G. DE. Estado De Pernambuco , Brasil Rainfall Variability Study in the Pernambuco State ,. n. 1, p. 82–92, 2011.

MIRANDA, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: . Acesso em: 21 jun. 2015.

MOLION, C. B. PERSPECTIVAS CLIMÁTICAS PARA OS PRÓXIMOS 20 ANOS. **Revista Brasileira de Climatologia**, p. 12, 2008.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MYINT, S. W. et al. Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 5, p. 1145–1161, 2011.

NACIONAL, M. DA I. **Relatorio de Integração do Rio Sao Francisco com bacias hidrograficas do nordeste setentrional** Zhurnal Eksperimental’noi i Teoreticheskoi Fiziki. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>>. acesso em 21/03/2016.

NIE, W. et al. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed. Journal of Hydrology, v. 407, n. 1–4, p. 105–114, 2011.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool -Theoretical Documentation: Version 2009. 2011. College Station, Blackland Research Center, Texas A&M University, 647 p. 2009.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.E. River flow forecasting through conceptual models - Part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, (3), 1970, p.282-290.

NICKS, A.D. 1974 Estochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daly rainfall. p. 154 – 171. In Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tuscon, AZ. Aug-Sept. 1971 USDA Misc. Publ. 1275. US. GOV. Print. Office, Washington, DC.

NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F. tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos atlântico e pacífico e variabilidade de precipitação em pernambuco. *Mercator*, v. 13, n. 1, p. 107–118, 30 abr. 2014.

NÓBREGA, R. SILVA; GALVÍNCIO, J. D. Modelagem climática no nordeste do Brasil: cenários e incertezas. In: GALVÍNCIO, J. D.; SILVA, D. F. (Orgs.). **Mudanças climáticas e recursos hídricos: aplicações no estado de Pernambuco**. Recife: GalvínCIO e Silva, 2009, p.1-25.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. São Paulo. ed.: Edgard Blücher, 2008, 363p.

OHLSSON, L. Water Conflicts and Social Resource Scarcity. *Phys. Chem. Earth*, 25, (3), 2000, p.213-220.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL, OMM. **Climatic Change**. 1.ed. Geneva: WMO, 1966. 80p.

OLIVEIRA, M. . et al. História geológica e Ciência do clima : métodos e origens do estudo dos ciclos climáticos na Terra. *Terra*, v. 12, p. 3–26, 2015.

OTUKEI, J. R.; BLASCHKE, T. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 12, n. SUPPL. 1, p. 27–31, 2010.

PEEL, M. C. Hydrology: catchment vegetation and runoff. *Progress in Physical Geography*, v. 33, n. 6, p. 837–844, 2009.

PEKKARINEN, A.; REITHMAIER, L.; STROBL, P. Pan-European forest/non-forest mapping with Landsat ETM+ and CORINE Land Cover 2000 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 64, n. 2, p. 171–183, 2009.

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

REDO, D.; AIDE, T. M.; CLARK, M. L. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and

Mato Grosso, 2001–2009. **Journal of Land Use Science**, n. May 2012, p. 1–31, 2012.

ROY, D. P. et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154–172, 2014.

SAITO, N. S. et al. Uso Da Geotecnologia Para Análise Temporal Da Cobertura Florestal. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 11–18, 2016.

SAKAGUCHI, A. et al. Development and evaluation of a paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. **Agricultural Water Management**, v. 137, p. 116–122, 2014.

SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the brazilian caatinga. In: Bullock, S. H.; Mooney, H. A. e Medina, E. (eds.). *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

SANTOS, A. M. DOS; GALVÍNCIO, J. D. Mudanças climáticas e cenários de susceptibilidade ambiental à desertificação em municípios do estado de Pernambuco. **OBSERVATORIUM: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 5, n. 13, p. 66–83, 2013.

SANTOS, T. E. M. DOS; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semi-árido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 217–225, 2009.

SCHNEIDER, A.; FRIEDL, M. A.; POTERE, D. Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on “urban ecoregions”. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 8, p. 1733–1746, 2010.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. **Ecological Modelling**, v. 201, n. 3–4, p. 301–311, 2007.

SCHUOL, J. et al. Modeling blue and green water availability in Africa. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, p. 1–18, 2008.

SETEGN, S. G. et al. Modeling hydrological variability of fresh water resources in the Rio Cobre watershed, Jamaica. **Catena**, v. 120, p. 81–90, 2014.

SHALABY, A.; TATEISHI, R. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. **Applied Geography**, v. 27, n. 1, p. 28–41, 2007.

SKANSI, M. DE LOS M. et al. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295–307, 2013.

SORENSEN, S. B.; MORSSINK, C.; CAMPOS, P. A. Safe access to safe water in low income countries: Water fetching in current times. **Social Science and Medicine**, v. 72, n. 9, p. 1522–1526, 2011.

- STRAHLER, A. H. The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 10, n. 2, p. 135–163, 1980.
- TABARI, H.; TALAEI, P. H. Temporal variability of precipitation over Iran: 1966-2005. **Journal of Hydrology**, v. 396, n. 3–4, p. 313–320, 2011.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- TROVÃO, D. M. D. B. M. et al. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 83, p. 307–311, 2007.
- UNESCO. **Água para todos, água para la vida**. Paris, 2003.
- VAN LIEW, M. W. et al. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173–189, 2007.
- WANG, J. et al. Understanding the Water Crisis in Northern China: What the Government and Farmers are Doing. **International Journal of Water Resources Development**, v. 25, n. 1, p. 141–158, 2009.
- WENG, Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 34–49, 2012.
- WULDER, M. A. et al. An accuracy assessment framework for large-area land cover classification products derived from medium-resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 663–683, 2006.
- YANG, J. et al. Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference. **Journal of Hydrology**, v. 340, n. 3–4, p. 167–182, 2007.
- YANG, J. et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1–2, p. 1–23, 2008.
- ZHAO, A. et al. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China. **Catena**, v. 137, p. 318–327, 2015.
- ZHU, Z.; WOODCOCK, C. E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 144, p. 152–171, 2014.