
Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA

Evaluation of the effects of climate change on the hydrological response of the Paraguaçu river basin

Erick de Lima Sebadelhe Valério¹ e Carlos Ruberto Fragoso Júnior²

¹ Universidade Federal de Alagoas, Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento, Porto Alegre, RS, Brasil

ericksebadelhe@hotmail.com

² Universidade Federal de Alagoas, Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento, Maceió, AL, Brasil

cruberto@ufal.br

Recebido: 14/04/15 - Revisado: 12/05/15 - Aceito: 16/07/15

RESUMO

As mudanças climáticas podem aumentar os conflitos por água em várias regiões do planeta. Previsões de longo prazo indicam que muitas áreas de semiárido, incluindo o nordeste brasileiro, irão sofrer uma diminuição dos recursos hídricos. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar os efeitos das alterações na precipitação, devido a mudanças climáticas, na resposta hidrológica da bacia do rio Paraguaçu-BA, bem como avaliar a aplicabilidade de alguns modelos climáticos e do modelo hidrológico na bacia em estudo. Projeções de anomalias na precipitação e na temperatura foram geradas através de um conjunto de modelos climáticos e as séries sintéticas de precipitação serviram como entrada para o modelo hidrológico SWAT. Os resultados foram analisados através de comparações entre os cenários. O modelo hidrológico apresentou desempenho satisfatório em representar as vazões da região estudada, considerando a maior dificuldade em representar a variabilidade em escala diária. Para todos os cenários avaliados, verificou-se uma tendência na diminuição das chuvas e das vazões a curto e a longo prazo. Porém, é importante destacar que as projeções obtidas através de modelos climáticos globais possuem grandes incertezas associadas, principalmente para simulações de longo prazo.

Palavras-chave: Modelos climáticos. MAGICC/SCENGEN. SWAT

ABSTRACT

Climate changes can increase conflicts over water in several regions of the planet. Long term predictions indicate that many semi-arid areas, including the northeast of Brazil, will suffer a decrease of water resources. In this context, this study aimed to evaluate the effects of changes in precipitation due to climate changes on the hydrological response of the Paraguaçu river basin, as well as to evaluate the applicability of climate models and hydrological modeling in the studied area. Projections of precipitation anomalies were generated through a set of climate models, where synthetic precipitation series were used as an input in the hydrological model SWAT. The results were analyzed by comparing scenarios. The hydrological model showed satisfactory performance in representing the flow rates of the studied region, reflecting the greater difficulty in representing river flow variability considering a daily scale. For all scenarios evaluated, there was a trend to reduction of the rainfall and flow rates on the short and long term scale. However, it should be noted that the projections obtained from global climate models have many uncertainties, especially for long-term simulations.

Keywords: Climate models. MAGICC/SCENGEN. SWAT.

INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro tem como principal característica a alta variabilidade espacial e temporal do clima, que está associada ao elevado grau de vulnerabilidade a que este ambiente está submetido. O padrão de variação climática expõe a região a eventos extremos de seca e atribui grandes incertezas sobre os recursos hídricos, impondo uma utilização mais conservadora e uma relativa redução nos estoques de água disponíveis (TUCCI; BRAGA, 2003).

Somada a essas características está a ocorrência de mudanças climáticas que têm afetado o ciclo hidrológico e os eventos extremos, com impactos na disponibilidade dos recursos hídricos em âmbito global e regional. Essas mudanças podem ser entendidas como modificações no clima ao longo do tempo, que podem ser verificadas através de mudanças de médias e/ou variações de propriedades. Essas alterações podem ser provocadas pela variabilidade climática natural, condicionada a fatores naturais e suas interações, e/ou como resultado das atividades antrópicas (IPCC, 2007; MARENGO et al., 2011; TUCCI; BRAGA, 2003).

Na década de 1990 o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), objetivando avaliar, com bases científicas, as variações no clima e os possíveis cenários futuros de mudanças. Em fevereiro de 2007, o IPCC divulgou seu 4º relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do Planeta (AR4) que afirma que é bem provável (probabilidade de ocorrência maior que 90%) que a elevação na temperatura global média, verificada nos últimos 50 anos, seja resultado da ação antrópica. As projeções contidas no documento referem-se a um aumento na temperatura global entre 1,8 e 4,0° C até o ano de 2100. A estimativa mais confiável projeta um aumento de 3° C para um cenário onde os níveis de dióxido de carbono se estabilizem em 45% acima da média atual (AVILA, 2007).

O 4º Relatório afirma que as mudanças climáticas irão aumentar os conflitos por água em várias regiões do planeta, projetando com alto grau de confiança (nível 8 numa escala de confiança que vai até 10) que muitas áreas de semiárido, incluindo o nordeste brasileiro, irão sofrer uma diminuição dos recursos hídricos (IPCC, 2007). A consequência seria o aumento na quantidade de áreas afetadas pela seca, além de potenciais impactos negativos em diversos setores, como por exemplo, abastecimento humano, agricultura, geração de energia e saúde.

Em relação às chuvas, projeta-se, com média a alta confiança (níveis 5 a 8, numa escala de 10), que a região nordeste apresentará chuvas mais fracas nas estações chuvosas. Simulações de balanço hídrico para as regiões do Brasil, considerando estas projeções de temperatura e chuva, sugerem uma tendência de deficiência hídrica por praticamente todo o ano para o nordeste, o que denota uma tendência de transformação do semiárido em uma região árida até o fim do século XXI (MARENGO et al., 2011).

Neste cenário os impactos seriam devastadores. Espera-se que cerca de 70% das cidades com mais de 5.000 habitantes, localizadas no semiárido nordestino, enfrentem uma séria crise

de abastecimento de água para consumo humano até o fim de 2025, atingindo cerca de 41 milhões de habitantes da região do semiárido e entorno (ANA, 2006). De acordo com Marengo et al. (2011) o nordeste é a região mais vulnerável a mudanças climáticas. Num clima mais quente no futuro, a região pode se tornar árida, afetando a agricultura de subsistência, a disponibilidade de água e a saúde da população. Esses impactos poderiam gerar ondas de migração para as cidades da região ou de outras regiões, aumentando ainda mais os graves problemas sociais já existentes nos grandes centros urbanos.

Para obter essas projeções de cenários futuros e realizar os estudos acerca dos impactos de ordem ambiental e socioeconômica, tem sido utilizado cada vez mais os modelos climáticos. Essa ferramenta é a base dos resultados divulgados pelo IPCC e tantos outros estudos sobre o clima, tendo adquirido grande importância na busca por soluções para mitigar os possíveis danos das mudanças e para orientar a gestão. Assim, os modelos climáticos apontam como uma ferramenta de fundamental importância para conhecer os cenários projetados e seus efeitos em uma região tão vulnerável a mudanças como o semiárido brasileiro.

Segundo Marengo et al. (2011) os modelos climáticos são as principais ferramentas para tentar projetar o clima do futuro. Eles representam, de forma simples, o complexo sistema climático por meio de componentes e processos, utilizando métodos quantitativos para simular as interações da atmosfera, oceanos, superfícies continentais e gelo. Com o avanço computacional, os modelos climáticos foram se tornando mais complexos, à medida em que foram sendo acrescentados mais componentes, como a dinâmica dos oceanos, as trocas na superfície da terra e os aerossóis. Apesar disso, a representação do sistema ainda é feita de forma simplificada, uma vez que não é possível representar todos os processos existentes na natureza.

Muitos modelos climáticos foram desenvolvidos por instituições de todo o mundo. O HadCM3, desenvolvido na Inglaterra pelo Hadley Centre for Climate Prediction and Research, o modelo russo INMCM3.0, produzido pelo Institute of Numerical Mathematics/Russian Academy of Science, e o FGOALS1.0, desenvolvido na China pelo Institute of Atmospheric Physics/Chinese Academy of Science, são alguns exemplos desses modelos (WIGLEY, 2008).

Os modelos climáticos são avaliados quanto à sua capacidade de simular adequadamente o clima atual e o passado em relação às condições médias e suas variações. Dessa forma, se um modelo consegue representar bem o clima passado até o presente, admite-se que as projeções futuras serão aceitáveis. Porém, para simular o sistema climático global são necessárias grandes quantidades de recursos computacionais, o que limita o tempo total de simulação e o tamanho da grade utilizada. Atualmente, os Modelos Climáticos Globais (Global Climate Models - GCM) utilizam células bastante largas, com tamanho entre 100 e 300 km². Apesar dessa limitação, eles conseguem fornecer a ideia de como as mudanças ocorrem em grande escala (MARENGO et al., 2011).

Para avaliar mais detalhadamente as mudanças em nível de regiões, estados ou cidades, um dos métodos utilizados é o “Downscaling”, que consiste no aumento da resolução espacial

do modelo climático, através da inserção de dados locais em modelo climático de maior escala. O uso dessa técnica possibilita uma melhor representação da região e dos processos ocorridos em menor escala. Dessa forma, foram desenvolvidos modelos regionais propostos para prever com maiores detalhes fenômenos climatológicos evidenciados em sistemas de mesoscala. A compreensão das mudanças climáticas em diferentes cenários de emissões, em escala regional de boa resolução, é fundamental quando se tem como objetivo mitigar possíveis danos e planejar ações adaptativas para as projeções climáticas do futuro (COONEY, 2012).

De acordo com Bravo et al. (2012), alguns trabalhos têm mostrado que as previsões de longo prazo obtidas por um conjunto de modelos globais apresentam melhores resultados quando comparadas àquelas obtidas através do uso exclusivo de modelos que foram desenvolvidos para melhor representar a climatologia do local.

Para prever os impactos que as mudanças climáticas provocarão sobre os recursos hídricos, busca-se associar os modelos climatológicos aos modelos hidrológicos (e.g. CHIEN; YEP; KNOUFT, 2013; FARAMARZI et al., 2013; RIMMER et al., 2011; VAGHEFI et al., 2013; ZABALETA et al., 2014). No nordeste muitos trabalhos têm sido desenvolvidos associando modelos hidrológicos e modelos climáticos (e.g. ESCARIÃO et al., 2012; GENZ; Silva; Tanajura, 2012; MEDEIROS, 2003).

Nesse contexto, os modelos do clima oferecem as projeções futuras de, por exemplo, temperatura e precipitação, que servirão como dados de entrada do modelo hidrológico, obtendo como resultado o comportamento da bacia hidrográfica em um determinado cenário futuro, sendo possível avaliar os efeitos das mudanças sobre a qualidade e disponibilidade da água, e a forma como estas irão impactar o ecossistema.

No banhado do Taim, no Rio Grande do Sul, um conjunto de modelos climáticos globais foi utilizado para projetar cenários do clima futuro, aplicando o resultado como entrada em um modelo hidrodinâmico para estimar os níveis d'água. Como resultado, verificou-se que, quando considerado o conjunto de modelos que melhor representou a situação atual do clima da região, a tendência a aumento dos níveis do banhado foi mais evidente em todos os cenários e futuros analisados, ao mesmo tempo em que a faixa de incerteza dos resultados foi menor (BRAVO et al., 2012).

Na bacia hidrográfica do Kejie, no Himalaia oriental, o modelo climático HadCM3 foi associado ao Soil and Water Assessment Tool (SWAT), modelo hidrológico de base física desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - Serviço de Pesquisa Agrícola (USDA-ARS, na sigla em inglês), para avaliar os impactos combinados da cobertura da terra e mudanças climáticas sobre os processos hidrológicos. Os resultados demonstraram que as mudanças de uso do solo juntamente com os cenários de mudanças climáticas chegam a atingir cerca de 50% da atual e futura faixa de variabilidade inter-anual das chuvas e vazões (MA; XU; NOORDWIJK, 2010).

Um dos principais problemas na calibração e aplicação de modelos em geral é a existência de incertezas nas previsões. Segundo Abbaspour (2012), as principais fontes de incertezas estão relacionadas a: a) simplificação dos modelos; b) processos

existentes na bacia, mas não incluídos na concepção do modelo; c) processos incluídos no modelo, mas cujas ocorrências na bacia são desconhecidas pelo modelador; d) e processos desconhecidos pelo modelador que também não estão incluídos no modelo.

As avaliações dos efeitos de mudanças climáticas, utilizando projeções obtidas através de modelos, sempre serão dotadas de incertezas (KATZ et al., 2013). Isso se deve, principalmente, à forma simples como os modelos tentam representar um sistema tão complexo como o sistema climático. Em um estudo feito por Fyfe, Gillett e Zwiers (2013) foram comparados dados de aquecimento global observados e simulados através de modelos. Concluiu-se que o aquecimento global verificado nas últimas décadas é significativamente menor do que o aquecimento previsto em simulações utilizando modelos.

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando avaliar essas incertezas nas previsões (e.g. BAE; JUNG; LETTENMAIER, 2011; BRIGODE; OUDIN; PERRIN, 2013; FENG; Porporato; Rodriguez-Iturbe, 2013; JUNG; Moradkhani; CHANG, 2012; LUNG et al., 2013). Quando se busca prever os impactos nos recursos hídricos em regiões secas essa incerteza é ainda maior, conforme atestado por Faramarzi et al. (2013). Dessa forma, identificar e quantificar as fontes de incertezas associadas às previsões dos modelos é uma das etapas mais importantes na avaliação dos impactos das mudanças climáticas, sendo fundamental para tomar melhores decisões no que diz respeito a mitigação e adaptação (KATZ et al., 2013).

No presente trabalho, objetivou-se avaliar os efeitos das alterações na precipitação, devido a mudanças climáticas, na resposta hidrológica da bacia do rio Paraguaçu-BA, bem como avaliar a aplicabilidade de alguns modelos climáticos globais e do modelo hidrológico SWAT na bacia em estudo

METODOLOGIA

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraguaçu está localizada na região centro-leste do estado da Bahia (Figura 1), compondo a Região de Planejamento e Gestão das Águas - RPGA de número 10 (INEMA, 2013). Apresenta uma área de 54.877 km², abrangendo 83 municípios, incluindo Feira de Santana, a segunda maior cidade do Estado. Em sua superfície residem, aproximadamente, 1,7 milhões de pessoas, que constituem cerca de 12,68% da população do estado (GENZ; SILVA; TANAJURA, 2012; IBGE, 2010).

A bacia apresenta três tipos de clima: o clima Semiárido, evidenciado em cerca de 67% da área, ocupando a parte central da bacia; o clima Subúmido a Seco, predominante na parte superior da bacia, na região da Chapada Diamantina; e o clima Úmido a Subúmido, que predomina no terço inferior da bacia do rio Paraguaçu e em algumas pequenas áreas em sua nascente (GENZ; Silva; Tanajura, 2012).

Destaca-se na bacia a presença de grandes reservatórios, como Apertado, Bandeira de Melo, França, São José de Jacuípe e Pedra do Cavalo. O reservatório de Pedra do Cavalo, localizado no baixo curso do rio Paraguaçu, no Estado da

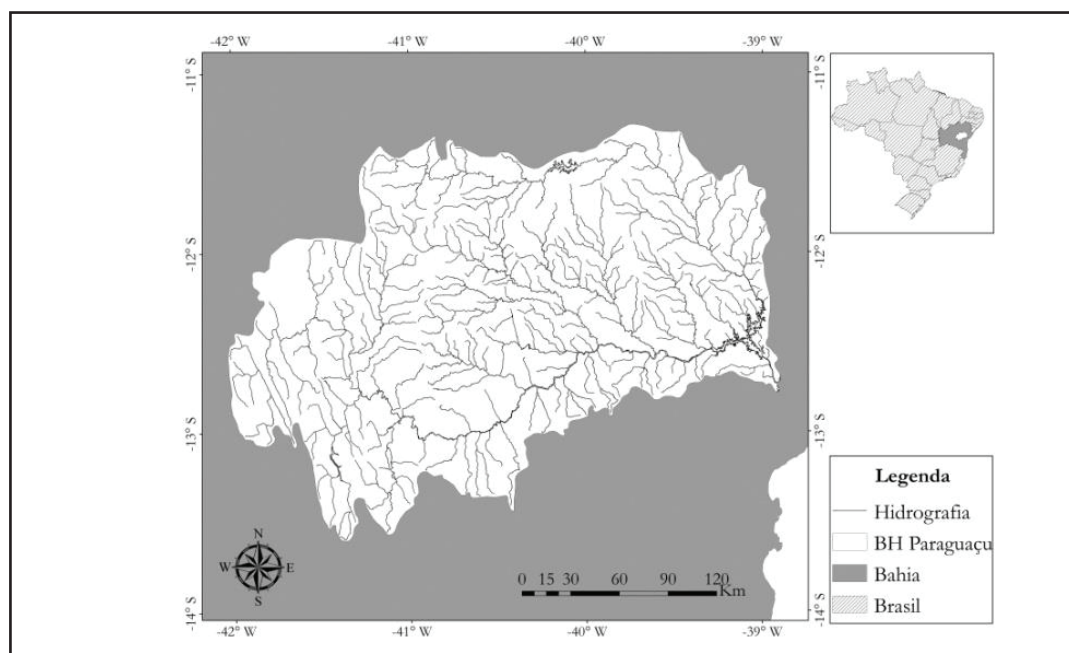


Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Paraguaçu

Bahia, foi projetado para usos múltiplos, entre eles o controle de cheias, abastecimento humano, irrigação e geração de energia elétrica (ANDRADE, 2010). Este reservatório possui grande importância para a região, pois, além de abastecer municípios do entorno, contribui com cerca de 60% do abastecimento da Região Metropolitana de Salvador (GENZ; Silva; Tanajura, 2012).

Descrição do Modelo Hidrológico

O Soil and Water Assessment Tool - SWAT é um modelo hidrológico de base física, do tipo distribuído, que foi desenvolvido nos Estados Unidos com a finalidade de prever impactos do gerenciamento do solo sobre os recursos hídricos, sedimentos e rendimento químico agrícola em grandes bacias hidrográficas (SANTHI et al., 2001; SINGH et al., 2005).

O modelo opera em intervalo diário, considerando uma escala de tempo contínua, e apresenta uma boa eficiência computacional, sendo capaz de simular longos períodos para avaliar os efeitos das possíveis mudanças verificadas na bacia. Os principais componentes do modelo incluem clima, hidrologia, temperatura, e propriedades e uso do solo. No SWAT, as bacias são divididas em sub-bacias, que, por sua vez, são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Unit -HRU). As HRU consistem em unidades homogêneas de uso e tipo de solo, cobertura vegetal e topografia. A produção de água em cada HRU é calculada com base na precipitação diária, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e o escoamento de retorno do aquífero raso. Alternativamente a bacia pode ser dividida apenas em sub-bacias, que são caracterizadas pelo tipo dominante de uso, características do solo e topografia (GASSMAN et al., 2007; NETO; FONTES; MEDEIROS, 2011).

A simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica é baseada na equação do balanço hídrico, sendo dividida em

duas fases: a fase terrestre do ciclo hidrológico, que controla a quantidade de água e aporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas no canal principal de cada sub-bacia; e a fase aquática, que corresponde ao movimento da água, sedimentos, nutrientes e pesticidas através da rede hidrográfica até o exutório da bacia (NEITSCH et al., 2011; PAGLIERO et al., 2014).

Para o cálculo da evapotranspiração potencial, fator que tem grande influência no balanço hídrico de regiões de semiárido, o modelo oferece três opções: o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965 apud NEITSCH et al., 2011); o método de Priestley-Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972 apud NEITSCH et al., 2011); e o método de Hargreaves (HARGREAVES; HARGREAVES; RILEY, 1985).

A subdivisão da bacia em área com combinações únicas de tipo e uso do solo (HRU) permite ao modelo refletir diferenças em evapotranspiração para diversas culturas e solos. O escoamento é calculado separadamente para cada HRU e encaminhado para obter o escoamento total da bacia hidrográfica, aumentando a precisão e fornecendo assim uma descrição física muito melhor do balanço hídrico na bacia em estudo (NEITSCH et al., 2011).

Devido as suas vantagens o SWAT tem sido amplamente aplicado em todo mundo para avaliar qualidade e disponibilidade de água, mudanças climáticas, sequestro de carbono, produção de sedimentos e produção agrícola (e.g. JHA, 2011; NOTTER et al., 2013; OEURNG; SAUVAGE; SANCHEZ-PEREZ, 2011; PISINARAS et al., 2009; TIBEBE; BEWKET, 2011).

Com a crescente preocupação mundial a respeito das mudanças climáticas e seus impactos, o modelo tem sido empregado em vários países como China, Estados Unidos e Índia, para tentar prever os possíveis efeitos que essas alterações no clima ocasionarão (e.g. DASGUPTA et al., 2013; FICKLIN; STEWART; MAURER, 2013; GUO; HU; JIANG, 2008; LI et al., 2009; WU; LIU; GALLANT, 2012).

No Brasil muitos trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando o modelo SWAT para avaliar a aplicabilidade do modelo para as regiões do país, obtendo resultados satisfatórios que comprovam que o modelo, apesar de ter sido desenvolvido em outro país, pode ser aplicado com grande eficiência também em território brasileiro (e.g. ARAGÃO et al., 2012, 2013; DURÃES; Mello; LELIS et al., 2012; Naghettini, 2011; NETO; FONTES; MEDEIROS, 2011). Isso indica uma grande possibilidade de avanço nos estudos das alterações climáticas no país utilizando o SWAT como ferramenta para auxiliar no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros.

Obtenção e Preparação dos Dados de Entrada

Os principais dados de entrada do modelo são: Modelo Digital de Elevação (MDE); mapa de uso e ocupação do solo; mapa de tipos de solos; e dados hidrológicos (precipitação e vazão) e climáticos (temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é um dado espacial requerido pelo SWAT na fase de pré-processamento para delimitar a bacia e suas sub-bacias. O MDE utilizado foi de Miranda (2005), em formato GEOTIFF (16 bits), com resolução espacial de 90 metros, Sistemas de Coordenadas Geográficas e Datum WGS-84. Elaborou-se um mosaico com as cartas SC-24-Y-D, SC-24-Z-C, SD-24-V-A, SD-24-V-B, SD-24-V-C, SD-24-V-D e SD-24-X-A, recortando-se em seguida a área correspondente a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

O mapa de uso e ocupação do solo foi do ano de 2004, obtido através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004). Preferiu-se utilizar as informações de uso do solo de um órgão oficial, sendo este o mapa mais recente encontrado e que apresentava dados de toda a área da bacia. Através da análise do mapa verificou-se a existência de 11 classes de uso e ocupação, sendo elas: agricultura/pecuária

(71,11%), uso predominante na bacia; área urbana (0,15%); brejo (0,19%); Caatinga (10,17%); campo limpo (1,39%); campo rupestre (2,66%); cerrado (2,70%); curso d'água (0,15%); floresta estacional (10,87%); floresta secundária (0,04%); lago/açude/represa (0,56%); e mangue (0,01%).

Apesar do SWAT possuir um extenso banco de dados com diversos tipos de uso e cobertura do solo, vegetações tipicamente brasileiras como caatinga e cerrado não estão incluídas no modelo, sendo necessário cadastrá-las inserindo um grande número de parâmetros. Devido a dificuldade em obter esses dados, utilizou-se o tipo de vegetação disponível no banco de dados do modelo que mais se aproxima da caatinga (Southwestern US Arid Range) e do cerrado (Range-Brush), em aspectos paisagísticos e morfológicos, conforme trabalho realizado por Santos (2013).

De acordo com EMBRAPA (2011), existem 6 tipos de solo na bacia: Latossolos (37%); Planossolos (33%); Cambissolo (20%); Neossolo (8%); Argissolo (1%); e Chernossolo (1%). As propriedades físico-químicas de cada solo foram obtidas através do Harmonized World Soil Database (FAO, 2012) e inseridas no banco de dados do SWAT. Entretanto, a variável, que representa o fator de erodibilidade para a Equação Universal de Perda de Solo (Universal Soil Loss Equation - USLE), exigida pelo modelo, teve que ser calculada com base em equações empíricas descritas em Williams (1995 apud ARNOLD et al., 2012).

Os dados de precipitação e vazão para a área de estudo foram obtidos no banco de dados disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA). As localizações das 47 estações pluviométricas e 8 estações fluviométricas são apresentadas na figura 2. As séries históricas de precipitação foram aplicadas como dado de entrada no modelo hidrológico, já os dados de vazão foram utilizados apenas no processo de calibração.

Na tabela 1 são apresentadas as estações fluviométricas selecionadas. Foi realizada a análise da disponibilidade, através da análise de diagramas de Gantt, e consistência das séries de

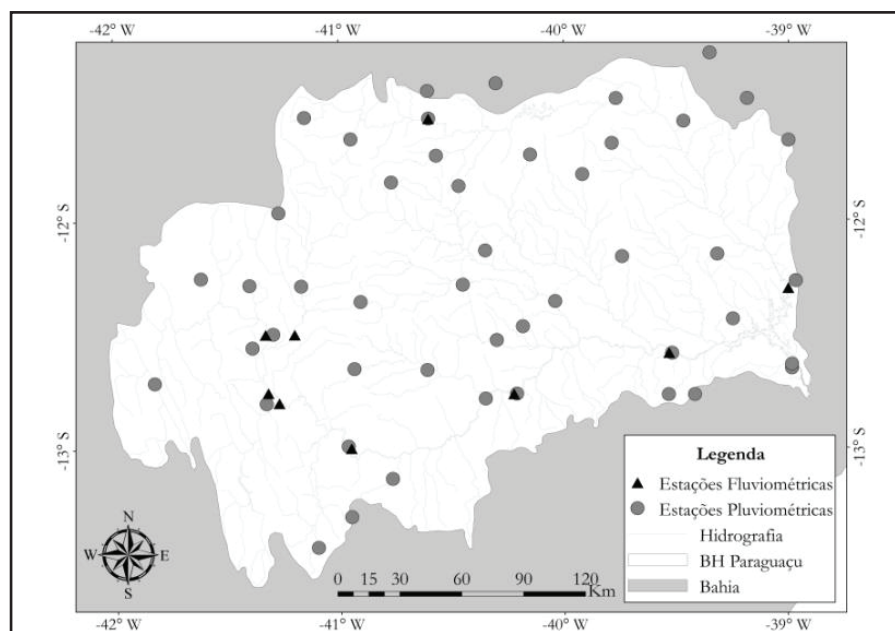


Figura 2 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas

dados de precipitação e vazão, verificando-se que o melhor período para o estudo é entre os anos de 1960 e 1990.

Tabela 1 - Postos Fluviométricos Selecionados

Código	Nome	Rio	Lat	Long
51140000	Porto	Santo Antônio	-12,49	-41,33
51170000	Utinga	Utinga	-12,50	-41,21
51190000	Fertém	Santo Antônio	-12,76	-41,33
51120000	Andaraí	Paraguaçu	-12,84	-41,32
51240000	Itaeté	Paraguaçu	-12,99	-41,96
51280000	Iaçu	Paraguaçu	-12,76	-40,21
51350000	Argoim	Paraguaçu	-12,59	-39,52
51460000	Ponte Rio Branco	Jacuípe	-12,23	-39,05

Os dados de temperatura do ar (máximas e mínimas), velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar foram obtidos através do Climate Forecast System Reanalysis (CFRSR) / National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (<http://globalweather.tamu.edu/>), que consiste em um sistema acoplado atmosfera-oceano-solo e gelo da superfície do mar, em escala global e de alta resolução. Esse sistema foi concluído em um período de 31 anos (1979-2010), sendo desenvolvido para fornecer as melhores estimativas desses domínios acoplados ao longo desse período.

A resolução global da atmosfera é de, aproximadamente, 38km com 64 níveis que se estendem desde a superfície até uma pressão de 0,26 hPa. A resolução global do oceano é de 0,25° no

Equador até 0,5° entre os trópicos, com 40 níveis até a profundidade de 4.737m. Para as superfícies do terreno e do gelo no mar o modelo possui 4 camadas e 3 camadas, respectivamente.

Foram obtidos os dados para a região compreendida entre as latitudes -13,75° e -11,25° e longitudes -42,25° e -38,75°, onde está inserida bacia do rio Paraguaçu, resultando num total de 96 estações climáticas. Os dados climáticos obtidos foram inseridos no SWAT com o auxílio da ferramenta WGNmaker 4.1, que consiste em uma macro do Excel, programada para calcular estatísticas das variáveis climáticas exigidas pelo modelo.

Calibração e Validação do Modelo Hidrológico

Após todos os dados necessários serem carregados no modelo, é necessário definir o período de simulação e se a saída será fornecida em intervalo de tempo diário, mensal ou anual. Os 31 anos de dados foram divididos da seguinte forma: 3 anos para aquecimento do modelo (1960 a 1962); 14 anos para calibração (1963 a 1976); e 14 anos para validação (1977 a 1990). A bacia foi dividida em 118 sub-bacias. Para subdividir as sub-bacias utilizou-se o método da HRU dominante, onde para cada uma das sub-bacias o modelo atribui apenas uma HRU, resultando em 118 unidades de resposta. O método aplicado para o cálculo da evapotranspiração potencial foi o Penman-Monteith.

Para a calibração, foram utilizados um total de 15 parâmetros, sendo 6 de águas subterrâneas, 3 de solos, 3 de HRU, 2 de canais e 1 de uso do solo. O ajuste dos parâmetros foi feito de montante para jusante, iniciando no posto mais a montante na bacia (Porto) e terminando no posto mais a jusante (Argoim) (ver Figura 3). Posteriormente realizou-se a calibração para o posto fluviométrico Ponte do Rio Branco, localizado no rio Jacuípe.

A calibração foi realizada manualmente, utilizando o método de tentativa e erro, em repetidas execuções do modelo

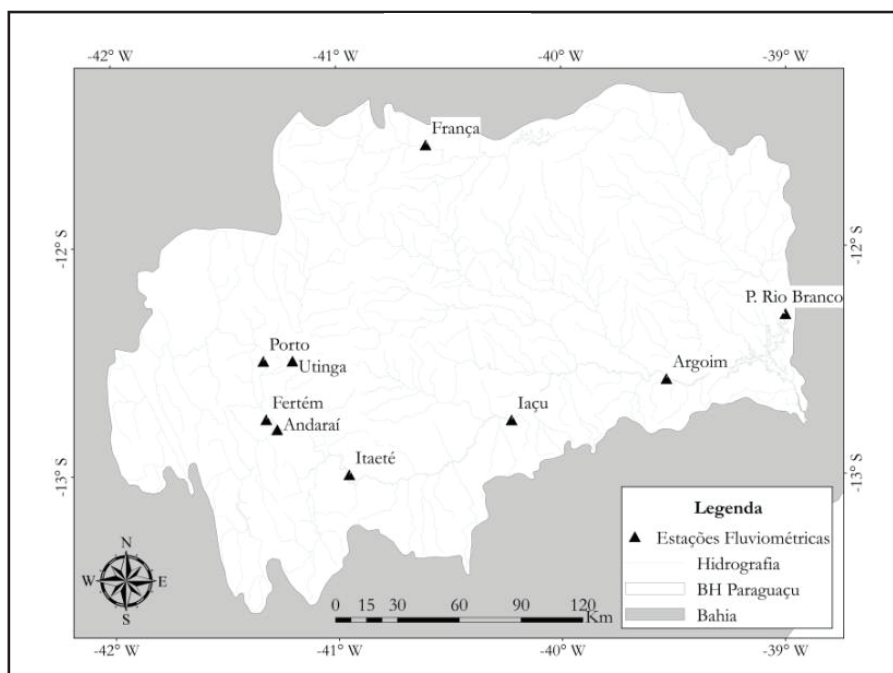


Figura 3 - Localização das estações fluviométricas utilizadas na calibração

e análise dos resultados. A cada tentativa buscou-se analisar o ajuste de vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo, volume, forma e tempo de ocorrência. Os métodos estatísticos utilizados para avaliar a qualidade do ajuste do modelo aos dados observados foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) e o Percentual de Tendência (PBIAS), conforme indicado por Moriasi et al. (2007).

O NSE pode variar entre menos infinito e 1,0, sendo NSE igual a 1,0 o valor ótimo. Valores entre 0,0 e 1,0 geralmente são vistos como níveis de desempenho aceitáveis e valores menores ou iguais a 0,0 indicam que a média dos dados observados pode fornecer uma melhor previsão do que os valores simulados pelo modelo. Quanto ao PBIAS, seu valor ótimo é de 0,0, baixas magnitudes indicam boa precisão na simulação do modelo. Valores positivos indicam tendência percentual do modelo de subestimação e valores negativos indicam tendência percentual de superestimação (GUPTA; Sorooshian; Yapo, 1999; MORIASI et al., 2007)

Definição dos Cenários de Mudanças Climáticas

Os cenários de emissão representam uma visão possível das emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis, sendo baseados numa combinação coerente e consistente de previsões sobre demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudança na tecnologia, assim como suas interações (TUCCI; BRAGA, 2003).

O IPCC baseou-se em quatro projeções diferentes de emissão de gases de efeito estufa para o futuro. Os cenários foram definidos no SpecialReportonEmissionsScenarios - SRES em, basicamente, quatro famílias: A1, A2, B1 e B2. Neste trabalho foram selecionados os cenários A2 (altas emissões) e B2 (baixas emissões) para projetar as condições climáticas. Os produtos dos modelos climáticos foram utilizados como condição de contorno no SWAT para simular a resposta da bacia diante desses cenários de emissões

Definição dos Modelos Climáticos

As projeções climáticas na região de estudo foram obtidas mediante aplicação do modelo MAGICC/SCENGEN, (Model for the Assessment of Green house gas Induced Climate Change/SCENario GENerator) versão 5.3, que considera as principais diretrizes estabelecidas pelo AR4 do IPCC. Este modelo tem sido utilizado para gerar projeções futuras de temperatura média global e nível médio do mar (WIGLEY, 2008).

O MAGICC baseia-se nos cenários do IPCC e dos Modelos de Circulação Global (MCG) para projetar as futuras concentrações de gases de efeito estufa, temperatura média global e nível médio do mar. Os dados de modificação na temperatura média são utilizados pelo SCENGEN para gerar os cenários de mudanças climáticas a partir de um banco de dados de resultados dos MCGs e utilizando o método pattern scaling descrito em Santer et al. (1990). Os resultados das projeções para cada cenário são dados em termos de variação na precipitação (%) e temperatura (°C) para cada mês do ano, e são apresentados em

uma grade de 2,5 x 2,5° que cobre todo o planeta. Os modelos climáticos utilizados pelo SCENGEN são no manual do usuário (ver WIGLEY, 2008).

Para definir os modelos que melhor representam o clima na região de estudo foi empregada a metodologia apresentada por Wigley (2008) e descrita por Bravo et al. (2012), que consiste em:

Calcular as medidas de desempenho para avaliar representação do clima atual;

Ordenar os modelos em função de cada uma dessas medidas de desempenho;

Analisar cada medida de desempenho da seguinte forma: os sete modelos que apresentaram os melhores valores recebem ranking igual a 1 e os sete piores recebem ranking igual a -1. Os restantes seis modelos recebem ranking igual a 0;

Para cada modelo, somar os rankings atribuídos em função de cada medida de desempenho obtendo um ranking final;

O conjunto de “melhores” modelos será integrado pelos sete modelos que apresentaram os maiores valores de ranking final, obtido no item 4;

O conjunto dos “piores” modelos é integrado pelos sete modelos que apresentaram os piores valores de ranking final, obtido no item 4.

A variável utilizada para caracterizar o clima atual foi a precipitação Anual. As medidas de desempenho analisadas foram: (1) Correlação; (2) Root Mean Square Error - RMSE e (3) BIAS. Essas estatísticas são calculadas comparando as saídas de cada modelo com a base de dados observados contida no SCENGEN.

Projeções de Anomalias na Temperatura e Precipitação

Para cada um dos cenários de emissão de gases previamente definidos foram simuladas as projeções de anomalias na temperatura e precipitação média mensal com base na média dos 7 modelos climáticos selecionados. As simulações climáticas consideraram dois futuros: o futuro próximo, janela de 30 anos centrada no ano de 2030; e o futuro longo, janela de 30 anos centrada no ano de 2070, seguindo a metodologia descrita por Bravo et al. (2012). Foram realizadas um total de 96 simulações no sistema MAGICC/SCENGEN.

Devido a resolução do SCENGEN, a bacia do rio Paraguaçu compreendeu 4 células climáticas, resultando em diferentes valores de anomalia por célula. Para perturbar o modelo em relação a temperatura, as sub-bacias foram agrupadas de acordo com a célula climática na qual se localizava. Utilizando o parâmetro TMPINC, que faz um ajuste nas temperaturas médias mensais em cada sub-bacia, as anomalias nas temperaturas médias mensais foram inseridas diretamente no SWAT.

As séries históricas de precipitação, no período de 1960 a 1990, obtidas nas estações pluviométricas foram perturbadas em função dos valores das anomalias estimadas nos cenários de mudança climática, da seguinte forma:

Os postos pluviométricos foram agrupados de acordo com a célula climática na qual estão localizados (ver Figura 4);

Todos os dias de todos os janeiros da série histórica de precipitação de cada posto foram multiplicados por $1 + \Delta P_{jan}$,

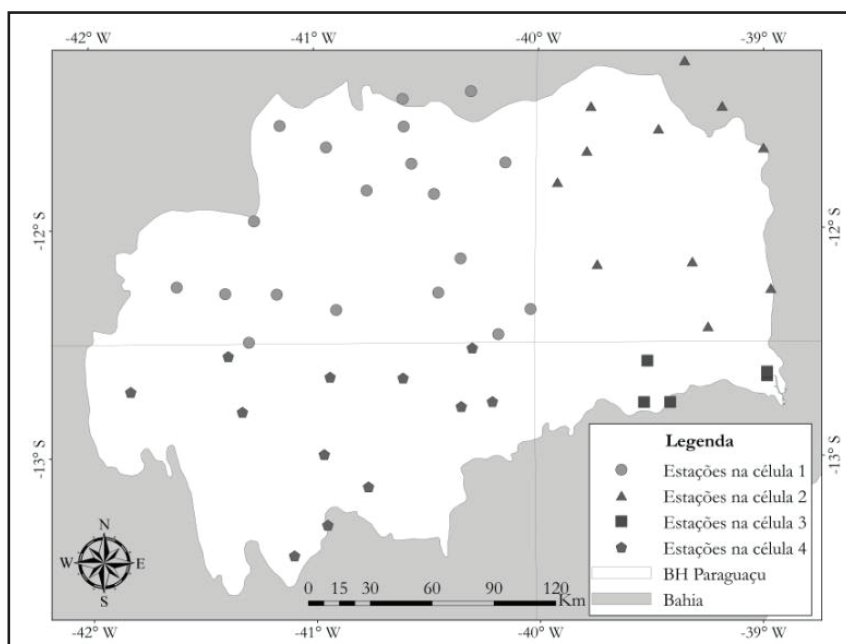


Figura 4 - Localização dos postos pluviométricos por célula

onde ΔP_{jan} corresponde a anomalia estimada na precipitação em suas respectivas células;

A etapa anterior foi repetida para todos os meses do ano e todos os 47 postos.

Todas as etapas descritas acima foram repetidas para as duas janelas (2030 e 2070) e para os dois cenários (A2 e B2), resultando em 188 séries sintéticas de precipitação diária.

Simulação dos Cenários

Com o modelo calibrado e representando bem a resposta da bacia, foram feitas as simulações para os cenários anteriormente definidos. Para isso, foram inseridas as séries sintéticas de precipitação e as anomalias de temperatura, resultando em duas simulações para cada cenário de mudança climática (uma para cada futuro). Após as simulações, realizou-se as análises dos resultados obtidos e comparações entre os cenários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem Hidrológica

Na etapa de modelagem, obteve-se uma grande variação nos valores dos parâmetros ao longo da bacia em estudo. Entretanto, como se trata de uma região que possui uma grande heterogeneidade física e climática, essa variação era esperada.

Devido a indisponibilidade de dados observados de profundidade do solo, o parâmetro SOL_Z foi ajustado para que o modelo pudesse representar melhor as características da bacia, como o solo raso na porção da bacia localizada na região do semiárido. Esse parâmetro se mostrou bastante sensível,

ocasionando grandes mudanças no hidrograma calculado na medida em que o parâmetro variava.

Na tabela 2 são apresentados os valores das estatísticas obtidas na calibração diária para cada uma das estações fluviométricas utilizadas.

Tabela 2 - Estatística dos ajustes obtidos na calibração diária para cada estação fluviométrica

	NSE	PBIAS
Porto	0,31	16,56
Utinga	0,41	13,43
Andaraí	0,31	-13,94
Itaeté	0,50	37,86
Iaçú	0,57	15,76
Argoim	0,60	1,11
P. Rio Branco	0,40	-13,80

Analisando a tabela 2 e a figura 3 é possível perceber que na medida em que se aumenta a área de drenagem, as estatísticas vão melhorando, sendo que os piores ajustes ocorreram na estação Porto e Andaraí (NSE=0,31), e o melhor ajuste ocorreu para a estação Argoim (NSE=0,60), mais próxima ao exutório da bacia.

Como o SWAT é um modelo bastante robusto, considerando vários processos e necessitando ser alimentado por um grande número de informações, na medida em que se diminui a área de drenagem são necessárias informações mais detalhadas para que o modelo consiga representar bem a realidade local. Isso ocorre porque em pequenas bacias os fenômenos hidrológicos se processam de maneira mais instantânea com uma dinâmica maior.

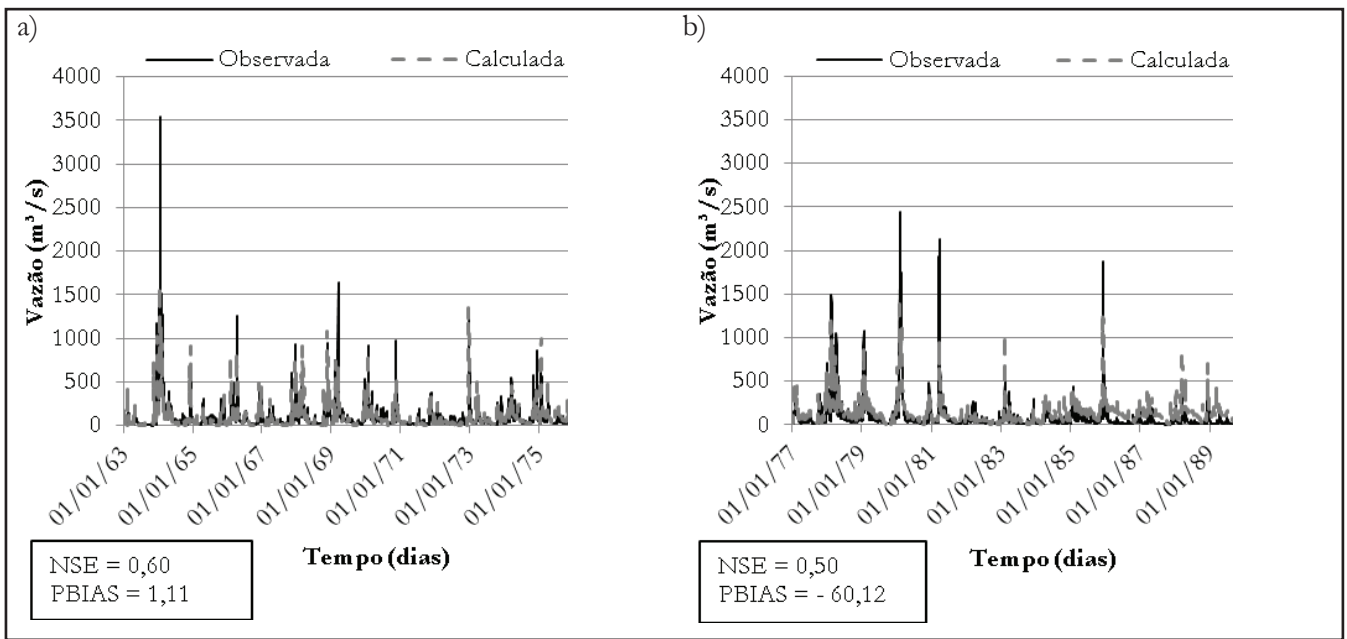


Figura 5—a) Calibração e b) validação diária para a estação Argoim (1963 a 1976)

Por outro lado, em áreas de drenagem maiores, com centenas de quilômetros quadrados, ocorre amortização dos processos hidrológicos relacionados à dinâmica da água no solo e são mais destacados os fenômenos de propagação do escoamento sobre a superfície e na rede de drenagem. Essas características resultaram em um melhor ajuste do modelo para bacias maiores. Conclusão semelhante foi obtida por Neto et al. (2014).

Na figura 5 são apresentados os hidrogramas e as estatísticas para calibração e validação diária para a estação Argoim.

Analisando o hidrograma obtido na calibração pode-se perceber que alguns picos foram subestimados, o que também pode ser evidenciado pelo valor obtido pelo PBIAS. De acordo com as faixas recomendadas por Moriasi et al. (2007), o de-

sempenho do modelo pode ser classificado como satisfatório (NSE=0,60) e muito bom (PBIAS=1,11).

Como os picos não ficaram bem ajustados, o NSE não ficou tão bom, uma vez que essa estatística é bastante sensível às vazões máximas. Porém, o valor obtido indica que o modelo teve uma performance aceitável em representar a bacia do rio Paraguaçu. Já o PBIAS nos mostra uma pequena tendência de subestimação das vazões calculadas pelo modelo. Entretanto, como o valor obtido foi próximo de zero, a performance do modelo pode ser avaliada como muito boa, de acordo com Moriasi et al. (2007).

Para o período utilizado para validação, as estatísticas calculadas atribuíram uma classificação satisfatória para o NSE

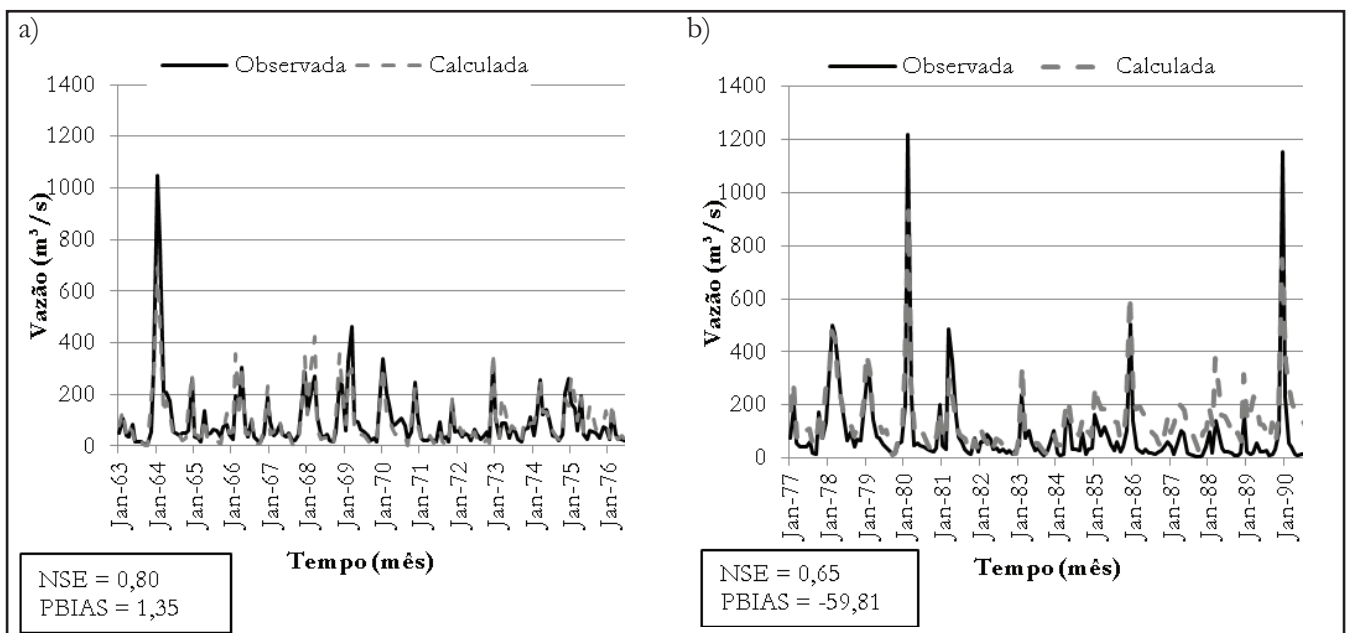


Figura 6—a) Calibração e b) validação mensal para a estação Argoim (1963 a 1976)

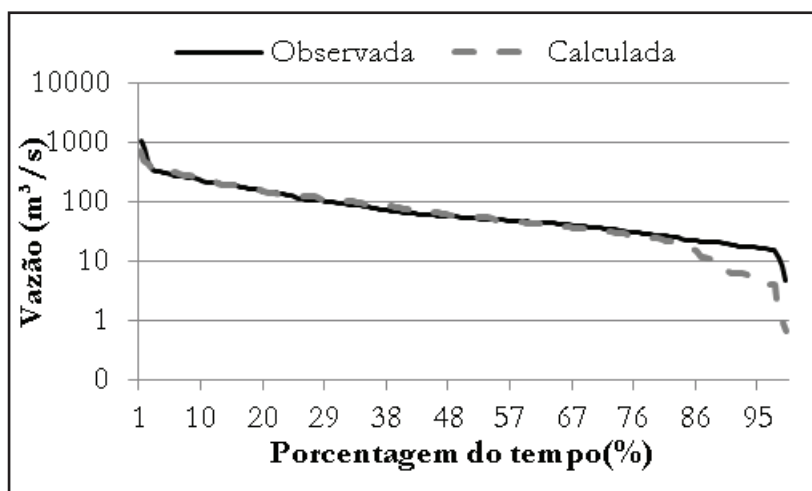


Figura 7 - Curva de permanência mensal para estação Argoim, no período calibrado (1963 a 1976)

(0,50) e insatisfatória para o PBIAS (-60,12). Analisando o hidrograma de validação na figura 5 pode-se perceber que houve uma subestimação dos picos, resultando numa diminuição do NSE, e superestimação das vazões de base da ordem de 60%, representada pelo valor negativo do PBIAS. Também é possível perceber uma modificação no padrão do hidrograma a partir do ano de 1984. Essa mudança pode ter sido ocasionada devido a alguma alteração no uso do solo ocorrida neste período, na região a montante da bacia. Wang et al. (2014) verificou que essas modificações no uso do solo provocam grandes alterações nos processos hidrológicos, resultando em impactos significativos na geração de vazão da bacia.

Na figura 6 são apresentados os hidrogramas e as estatísticas para calibração e validação mensal. Verifica-se que na calibração mensal, tanto o NSE quanto o PBIAS tiveram uma melhora significativa em relação a calibração realizada em

escala diária, passando para 0,80 e 1,35, respectivamente. Na validação em escala mensal também houve melhora nas duas estatísticas. O NSE aumentou de 0,50 para 0,65, enquanto o PBIAS passou de -60,12 para -59,81, mantendo a tendência de superestimação das vazões geradas.

Os valores do NSE obtidos na calibração e validação diárias para a estação Argoim foram semelhantes aos obtidos por Zhang, Liu e Wang (2014). Esses valores mais baixos para NSE diário do que para o mensal já eram esperados, uma vez que diversos trabalhos (e.g. GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014; JAIN; TYAGI; SINGH, 2010; PETERSON; HAMLETT, 1998; VARANOU et al., 2002) tem demonstrado que as previsões de vazões diárias do SWAT não são tão boas quanto as previsões mensais.

Na figura 7 são apresentadas as curvas de permanência mensais observadas e calculadas, em escala logarítmica.

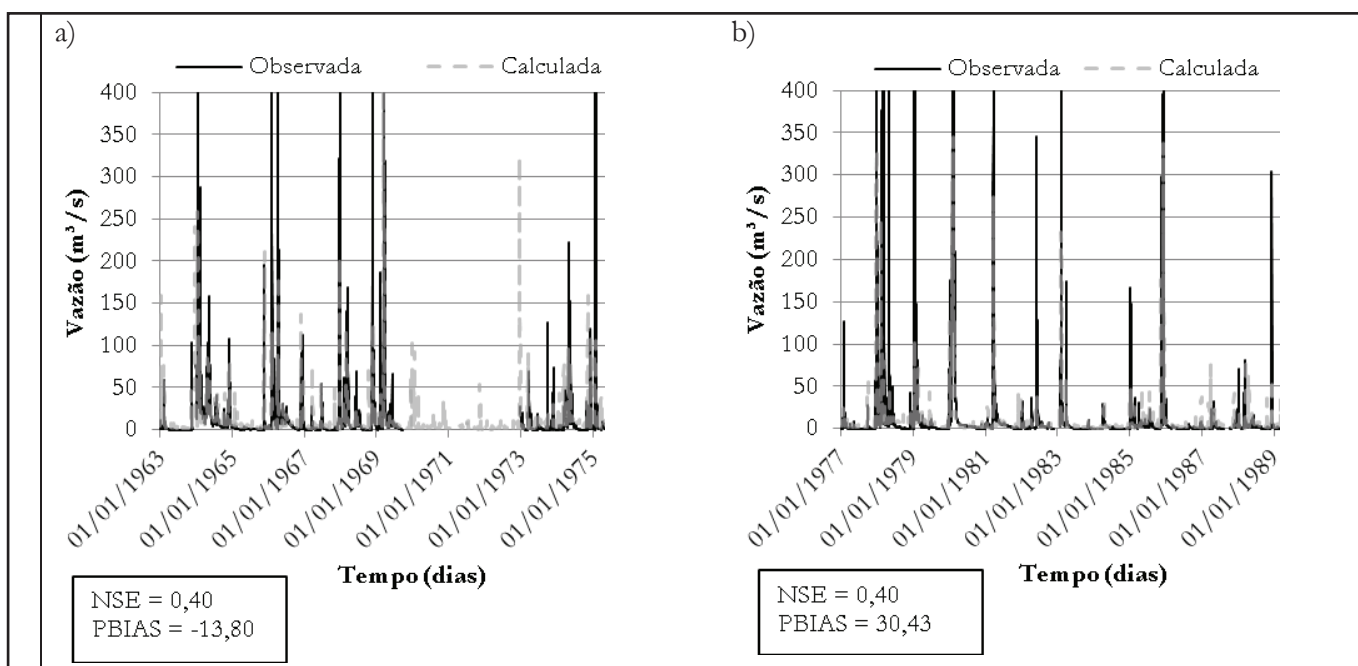


Figura 8-a) Calibração e b) validação diária para a estação Ponte Rio Branco (1963 a 1976)

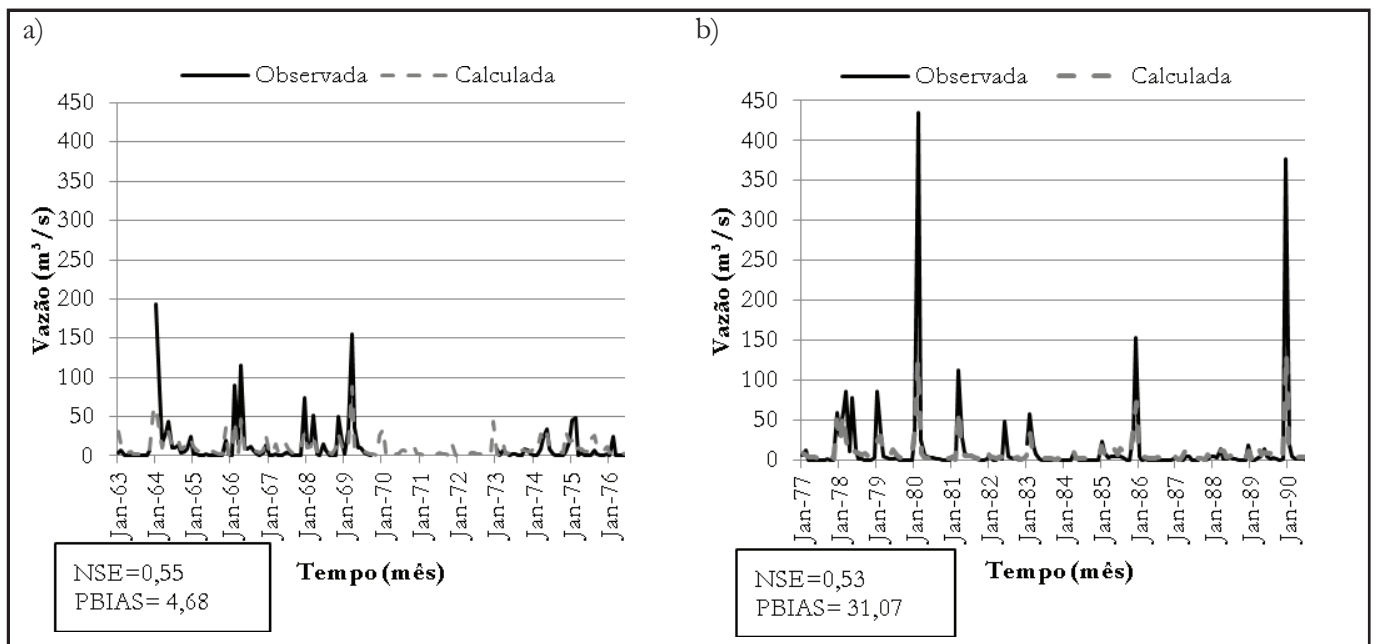


Figura 9—a) Calibração e b) validaçãomensal para a estação Ponte Rio Branco (1963 a 1976)

Através de uma análise da figura 7 percebe-se que houve um bom ajuste das vazões máximas e médias. Já para vazões mínimas, com permanência maior que 80%, o ajuste não foi bom. Como consequência, a avaliação da vazão com 90% de permanência, tomada como referência para concessão da outorga de uso da água no Estado da Bahia, fica prejudicada.

Na calibração diária para a estação Ponte Rio Branco, localizada na região cortada pelo rio Jacuípe, os ajustes não foram tão bons, resultando num NSE=0,40 (insatisfatório) e PBIAS=-13,80 (bom). Na validação, o NSE manteve o mesmo valor (0,40) e o PBIAS aumentou (PBIAS=30,43). A figura 8 apresenta os hidrogramas obtidos na calibração e validação, respectivamente, para a estação Ponte Rio Branco.

Pode-se perceber que os picos não foram bem ajustados, evidenciando um NSE baixo (0,40). Na calibração, mesmo com os picos subestimados, houve uma tendência de superestimação das vazões (representada pelo PBIAS negativo), uma vez que as vazões de base estão acima das observadas. Na validação, o índice PBIAS indicou uma tendência de subestimação das vazões calculadas da ordem de 30%.

Na figura 9 são apresentados os hidrogramas e as estatísticas obtidas na calibração e validação mensal para a estação Ponte Rio Branco.

Percebe-se que, assim como verificado na estação Argoim, as estatísticas melhoraram bastante quando o modelo passou a operar em escala mensal. Na calibração, o NSE aumentou para 0,55, indicando um desempenho satisfatório do modelo. O PBIAS diminuiu para 4,68, sendo avaliado como muito bom, conforme a classificação de Moriasi et al. (2007).

Para o período de validação também pode-se perceber uma melhora do modelo em relação ao NSE, que passou de 0,40 (escala diária) para 0,53. Já o PBIAS variou pouco, aumentando para 31,07, mantendo a tendência de subestimação das vazões. Destaca-se que no rio Jacuípe, a montante da estação Ponte do

Rio Branco, está localizado o reservatório de São José do Jacuípe (construído na década de 1980), destinado ao atendimento das demandas de abastecimento e irrigação.

Na figura 10 são apresentadas as curvas de permanência mensais observadas e calculadas para a estação Ponte Rio Branco, em escala logarítmica. Verifica-se que os ajustes não foram bons para a Estação Ponte Rio Branco, principalmente em relação as vazões mínimas. Fontes, Oliveira e Medeiros (2010) obtiveram resultados parecidos no que diz respeito a superestimação das vazões pelo SWAT, evidenciando que o modelo possui dificuldades em representar as interações entre o fluxo superficial e subterrâneo, com apresentação de retorno do escoamento de base com valores maiores que o observado na série histórica de vazão.

É importante ressaltar as limitações do modelo utilizado em representar as peculiaridades de rios de semiárido, como o rio Jacuípe, que são intermitentes, apresentando falha

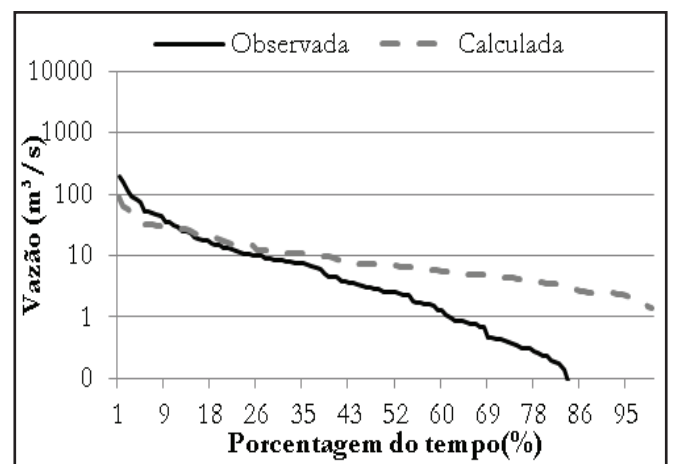


Figura 10 - Curva de permanência mensal para estação Ponte Rio Branco, no período calibrado (1963 a 1976)

de conectividade em sua rede fluvial durante longos períodos do ano. Além disso, Fontes, Oliveira e Medeiros (2010) e Genz, Silva e Tanajura (2012) atestam que nessa região em especial os dados são escassos e de baixa qualidade.

Definições dos Modelos Climáticos e Projeções de Anomalias

Na tabela 3 são apresentados os conjuntos de melhores e piores modelos em representar a precipitação anual para a região onde se localiza a bacia do rio Paraguaçu, de acordo com a metodologia que foi aplicada.

Tabela 3 - Melhores e piores modelos climáticos para representar a região analisada

Melhores modelos	Ranking Final	Piores modelos	Ranking Final
CCCMA-31	3	UKHADCM	-1
MPIECH-5	2	CSIRO-30	-1
NCARPCM1	2	GISS--EH	-1
CCSM--30	2	GFDLCM20	-2
ECHO---G	2	MIROCME D	-2
CNRM-CM3	1	GFDLCM21	-3
MIROC-HI	1	IPSL_CM4	-3

Utilizando o conjunto dos 7 melhores modelos climáticos, foram obtidas as projeções de anomalias na temperatura e precipitação para os dois cenários (A2 e B2) e os dois futuros (centrados em 2030 e 2070), para as quatro células climáticas na qual a bacia está inserida.

Avaliando as projeções de anomalias, percebeu-se que, a medida em que a temperatura aumenta, existe uma tendência da diminuição da precipitação ao longo do tempo, esperando-se uma maior diminuição para o futuro longo, centrado no ano de 2070. Observa-se também em quase todos os meses tendências semelhantes nas quatro células, com exceção do mês de agosto para o futuro longo dos dois cenários, onde as células 1 e 2 apresentaram uma tendência de aumento das precipitações.

Efeitos Sobre Precipitação e Vazão

Na figura 11 são exibidas as variações nas precipitações mensais, enquanto na tabela 4 são apresentadas as precipitações máximas, mínimas e médias anuais, e o desvio padrão para todos os cenários e futuros avaliados. Tomando como referência a precipitação média da bacia calculada pelo SWAT (com base nos dados observados das estações pluviométricas utilizadas), em todos os cenários e futuros analisados observou-se projeções de diminuição nas precipitações da bacia do rio Paraguaçu. Para o cenário A2, verificou-se uma diminuição de aproximadamente 9% da precipitação anual para o futuro próximo e 17% para o

futuro longo. Para o cenário B2, as precipitações anuais diminuíram cerca de 13% no futuro próximo e 19% para o futuro longo. Esses resultados se mostraram bastante interessantes, uma vez que verificou-se uma maior diminuição na precipitação para o cenário de baixas emissões (B2).

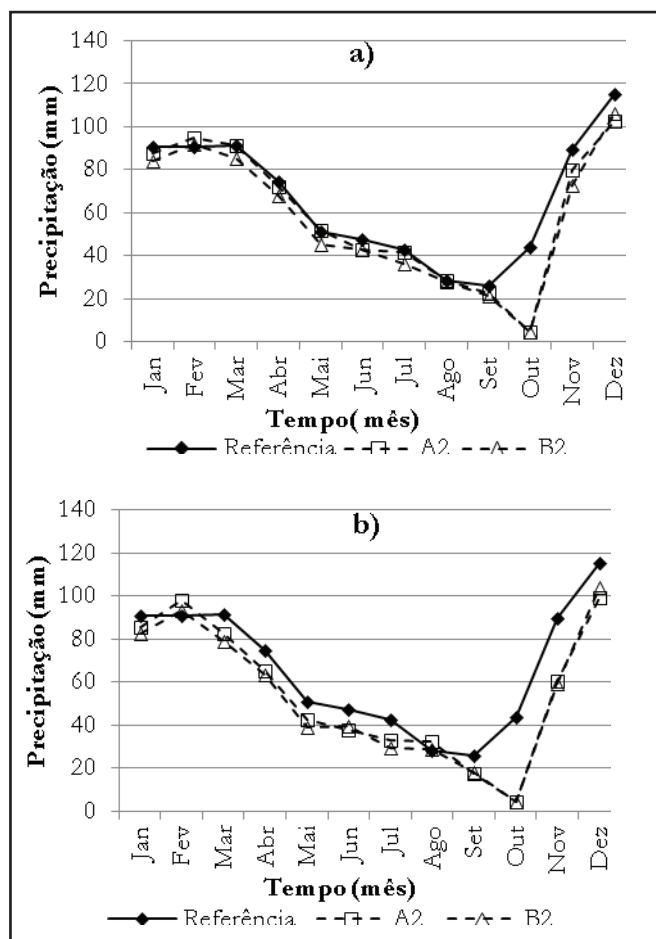


Figura 11 - Variação na precipitação média mensal para todos os cenários e futuros - a) ano 2030 e b) ano 2070

Tabela 4 - Precipitações anuais na bacia do rio Paraguaçu

	Referência	2030		2070	
		A2	B2	A2	B2
Média (mm)	791,74	719,84	685,64	658,06	639,64
Máxima (mm)	1270,95	1179,22	1113,37	1078,24	1037,56
Mínima (mm)	460,45	424,41	403,91	388,45	377,66
Desvio Padrão	192,11	185,80	178,26	175,37	170,30

Analisando as precipitações médias mensais podemos verificar que, apesar da diminuição da chuva média em quase todos os meses, não houve mudanças significativas no padrão de distribuição da precipitação ao longo do ano, indicando uma manutenção da sazonalidade mesmo para o futuro longo. Esse

resultado é semelhante ao obtido por Genz, Silva e Tanajura (2012).

As precipitações máximas, mínimas e médias anuais foram reduzidas em todos os cenários, sendo menores para o futuro longo. Quanto ao desvio padrão, houve reduções de aproximadamente 9% e 11% para o futuro longo dos cenários A2 e B2, respectivamente.

Como os melhores resultados na calibração foram obtidos para a estação fluviométrica Argoim, optou-se por realizar as simulações mensais dos cenários climáticos para avaliar os efeitos nas vazões nesse posto, sendo este representativo do comportamento do rio Paraguaçu, uma vez que trata-se da estação mais próxima ao exutório. Apesar do ajuste não ter sido satisfatório para a estação Ponte Rio Branco, as simulações dos cenários também foram realizadas para este posto a título de ilustração, uma vez que este está localizado em um importante afluente do rio Paraguaçu.

Como esperado, uma vez que as precipitações indicaram tendência de redução em todos os cenários, as vazões também foram reduzidas nas duas estações analisadas. Nas tabelas 5 e 6 são apresentadas as percentagens relativas de diminuição ou aumento das vazões médias e da vazão com 90% de permanência, que é referência para outorga de direito do uso da água no estado da Bahia, calculadas para as estações Argoim e Ponte Rio Branco em todos os cenários e futuros.

Tabela 5–Variações das vazões na estação Argoim

Vazão	ARGOIM			
	A2-2030	B2-2030	A2-2070	B2-2070
Qméd	-20,78%	-29,52%	-36,56%	-40,15%
Q90	-69,66	-78,17%	-83,42%	-88,66%

Tabela 6–Variações das vazões na estação Ponte Rio Branco

Vazão	PONTE RIO BRANCO			
	A2-2030	B2-2030	A2-2070	B2-2070
Qméd	-20,42%	-30,52%	-38,97%	-43,06%
Q90	-30,73%	-44,79%	-65,32%	-67,86%

Para o rio Paraguaçu (estação Argoim), verificou-se que houve uma redução significativa da Q90 para o futuro longo do cenário B2, diminuindo cerca de 88%. Para o rio Jacuípe, representado pela estação Ponte Rio Branco, o caso mais crítico também ocorre para o futuro longo do cenário B2, onde a Q90 sofre uma redução de aproximadamente 68%.

Os desdobramentos de uma redução dessa ordem nas vazões da bacia do rio Paraguaçu podem ser bastante preocupantes, uma vez que se trata de uma bacia de grande importância para o estado da Bahia. Essa diminuição pode conduzir a uma situação de insustentabilidade dos recursos hídricos da região, reduzindo suas disponibilidades e intensificando os conflitos pelo uso da água. Como consequência, seriam observados impactos negativos em diversos setores, como abastecimento humano, agricultura e geração de energia, que se beneficiam das águas do Paraguaçu.

Escarião et al. (2012) mostrou que a escolha do modelo hidrológico influencia diretamente os resultados das simulações de vazão quando a região é submetida a cenários de mudanças climáticas, devendo esse fato ser considerado como mais uma incerteza nos estudos hidrológicos dessa natureza.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar os efeitos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia do rio Paraguaçu a curto e longo prazo, utilizando um conjunto de modelos climáticos contidos no MAGICC/SCENGEN e o modelo hidrológico SWAT.

O modelo hidrológico SWAT apresentou desempenho satisfatório em representar as vazões da região estudada, considerando a maior dificuldade em representar a variabilidade em escala diária. Para o rio Jacuípe, importante afluente do rio Paraguaçu, a dificuldade do modelo em representar as interações entre o escoamento subterrâneo e a rede fluvial foi um fator importante para que não fosse possível obter melhores ajustes.

A quantidade de informações exigidas e parâmetros existentes atribuem uma grande complexidade ao modelo, uma vez que são necessários muitos dados para que este consiga fornecer uma melhor resposta, principalmente quando se trabalha com pequenas bacias.

Para todos os cenários avaliados, verificou-se uma tendência na diminuição das chuvas e das vazões a curto e a longo prazo, a medida em que a temperatura aumenta. As maiores reduções foram obtidas para o cenário de baixas emissões, projetando-se uma grande diminuição nas vazões com 90% de permanência para o futuro longo, centrado no ano de 2070. Esta situação pode impactar negativamente vários setores, intensificando conflitos pelo uso da água e agravando os problemas de escassez.

Salienta-se que existem muitas incertezas nas previsões geradas por modelos devido a forma simplificada como estes buscam representar os fenômenos que ocorrem na natureza. Para previsões climáticas a longo prazo e projeções de anomalias na precipitação, essas incertezas são ainda maiores, visto a dificuldade em que os modelos possuem em representar um sistema tão complexo como o sistema climático. Dessa forma, recomenda-se para estudos futuros a identificação e quantificação das fontes de incertezas existentes.

Como se trata de uma bacia de grande importância para o estado, os impactos negativos serão sentidos por milhões de pessoas, recomenda-se realizar avaliações de medidas mitigatórias e adaptativas que possam ser aplicadas para a região.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. *User Manual for SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs*. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol., Duebendorf, Switzerland, 2012.

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Atlas nordeste: abastecimento urbano de água: alternativas de oferta de água para sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais*. Brasília: ANA, 2006.
- ANDRADE, P. R. G. S. A complexa conexão entre sustentabilidade, conflitos e gestão de recursos hídricos: evidências de um estudo de caso. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza, CE. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2010. CD-ROM.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 37, n. 4, p. 1091-1102, jul./aug. 2013.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Modelagem do escoamento na sub-bacia do rio Japarutuba-Mirim (SE) através do modelo SWAT. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa, PB. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2012. CD-ROM.
- ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. *Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation Version 2012*. Texas: Texas Water Resources Institute, 2012. TR-439.
- AVILA, A. M. H. Uma Síntese do Quarto Relatório do IPCC. *Multiciência*, n. 8, p. 163-168, maio 2007.
- BAE, D-H.; JUNG, II-W.; LETTENMAIER, D. P. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *J. Hydrol.*, v. 401, n. 1, p. 90-105, Apr. 2011.
- BRAVO, J. M.; MARQUES, D. M.; TASSI, R.; CARDOSO, A. Avaliação Preliminar do Efeito de Projeções do Clima em Cenários Climáticos Futuros Sobre os Níveis d'água do Banhado do Taim, RS. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa, PB. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2012. CD-ROM.
- BRIGODE, P.; OUDIN, L.; PERRIN, C. Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? *J. Hydrol.*, v. 476, p. 410-425, Jan. 2013.
- CHIEN, H.; YEH, P. J. F.; KNOUFT, J. H. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. *J. Hydrol.*, v. 491, p. 73-88, May 2013.
- COONEY, C. M. Downscaling climate models: sharpening the focus on local-level changes. *Environ. Health Perspec.*, v. 120 n. 1, p. a22-a28, Jan. 2012.
- DASGUPTA, S.; GOSAIN, A. K.; RAO, S.; ROY, S.; SARRAF, M. A megacity in a changing climate: the case of Kolkata. *Climatic Change*, v. 116, n. 3, p. 747-766, Feb. 2013.
- DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. Aplicabilidade do Modelo SWAT Para Simulação Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, MG. *Cerne, Lavras*, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Mapa de solos do Brasil*. [S.l.]: EMBRAPA, Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. Disponível em: <http://mapoteca.cnps.embrapa.br/geoacervo/det_mapa.aspx>. Acesso em: 23 abr. 2015.
- ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; NETO, A. R. Influência do Modelo Hidrológico na Avaliação da Sensibilidade dos Recursos Hídricos a Cenários de Mudanças Climáticas em Região Semiárida. *RBRH: revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 81-91, ju./out. 2012.
- FAO. IIASA. ISRIC. ISS-CAS/JRC. *Harmonized World Soil Database*. Version 1.21. Rome, Italy: FAO; Laxenburg, Austria: IIASA, 2012.
- FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; FARZANEH, M. R.; ZEHNDER, A. J. B.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *J. Hydrol.*, v. 480, p. 85-101, Feb. 2013.
- FENG, X.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-Iturbe, I. Changes in rainfall seasonality in the tropics. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 811-815, 2013. doi: 10.1038/nclimate1907.
- FICKLIN, D. L.; STEWART, I. T.; MAURER, E. P. Effects of projected climate change on the hydrology in the Mono Lake Basin, California. *Climatic Change*, v. 116, n. 1, p. 111-131, Jan. 2013.
- FONTES, A. S.; OLIVEIRA, M. Q. C.; MEDEIROS, Y. D. P. Calibração do modelo SWAT em bacia do semi-árido com auxílio da hidrologia isotópica. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza, CE. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2010. CD-ROM.
- FYFE, J. C.; GILLET, N. P.; ZWIERS, F. W. Overestimated global warming over the past 20 years. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 767-769, 2013. doi:10.1038/nclimate1972.
- GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. ASABE*, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.
- GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and

- Insights. *J. Environ. Qual.*, v. 43, n. 1, p. 1-8, 2014. doi:10.2134/jeq2013.11.0466.
- GENZ, F.; SILVA, S. F.; TANAJURA, C. A. S. Impacto das mudanças climáticas nas vazões do rio Paraguaçu - cenário A1B de 2011 a 2040. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa, PB. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2012. CD-ROM.
- GUO, H.; HU, Q.; JIANG, T. Annual and seasonal streamflow responses do climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *J. Hydrol.*, v. 355, n. 1-2, p. 106-122, June 2008.
- GUPTA, H.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrol. Eng.*, v. 4, n. 2, p. 135-143, Apr. 1999.
- HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v. 111, n. 2, p. 113-124, June 1985.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Mapa de Vegetação do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Sinopse do censo demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse>>. Acesso em: 5 mar. 2013.
- INEMA - INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. *Mapa temático: regiões de planejamento e gestão das águas*. 2013. Disponível em: <<http://www.inema.ba.gov.br/download/458/>>. Acesso em: 12 mar. 2013.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A., editors.
- JAIN, S. K.; TYAGI, J.; SINGH, V. Simulation of Runoff and Sediment Yield for a Himalayan Watershed Using SWAT Model. *J. Water Resour. Protect.*, v. 2, p. 267-281, Mar. 2010.
- JHA, M. K. Evaluating Hydrologic Response of an Agricultural Watershed for Watershed Analysis. *J. Water*, v. 3, n. 2, p. 604-617, 2011.
- JUNG, II-W.; MORADKHANI, H.; CHANG, H. Uncertainty assessment of climate change impacts for hydrologically distinct river basins. *J. Hydrol.*, v. 466-467, p. 73-87, Oct. 2012.
- KATZ, R. W.; CRAIGMILE, P. F.; GUTTORP, P.; HARAN, M.; SANSÓ, B.; STEI, M. L. Uncertainty analysis in climate change assessments. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 769-771, 2013. doi:10.1038/nclimate1980.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo SWAT Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 36, n. 2, p. 623-634, 2012.
- LI, Z.; LIU, W. Z.; ZHANG, X. C.; ZHENG, F. L. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess of China. *J. Hydrol.*, v. 377, n. 1-2, p. 35-42, Oct. 2009.
- LUNG, T.; DOSIO, A.; BECKER, W.; LAVALLE, C.; BOUWER, L. M. Assessing the influence of climate model uncertainty on EU-wide climate change impact indicators. *Climatic Change*, v. 120, n. 1-2, p. 211-227, Sept. 2013.
- MA, X.; XU, J.; NOORDWIJK, M. V. Sensitivity of streamflow from a Himalayan catchment to plausible changes in land cover and climate. *Hydrol. Process.*, v. 24, n. 11, p. 1379-1390, May 2010.
- MARENGO, J. A. (COORD.); NOBRE, C. A.; CHOU, S. C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, L. M.; OBREGÓN, G. O.; SOARES, W. R.; BETTS, R.; KAY, G. *Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia*. [S.l.: s.n.], 2011. Projeto colaborativo realizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido.
- MEDEIROS, Y. D. P. Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas em Região Semi-árida. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 127-136, abr./jun. 2003.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). *Brasil em Relevô*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 28 jan. 2014.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *Trans. ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. *Soil and water assessment tool - Theoretical documentation: Version 2009*. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011. (Technical Report, no. 406).
- NETO, A. A. M.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semi-árido. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió, AL. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2011. CD-ROM.
- NETO, J. O. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; JUNIOR, A.

- V. M. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 177-188, jan./mar. 2014.
- NOTTER, B.; HURNI, H.; WIESMANN, U.; NGANA, J. O. Evaluating watershed service availability under future management and climate change scenarios in the Pangani Basin. *J. Phys. Chem. Earth*, v. 61-62, p. 1-11, 2013.
- OEURNG, C.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *J. Hydrol.*, v. 401, n. 3-4, p. 145-153, May 2011.
- PAGLIERO, L.; BOURAOUI, F.; WILLEMS, P.; DIELS, J. Large-Scale Hydrological Simulations Using the Soil Water Assessment Tool, Protocol Development, and Application in the Danube Basin. *J. Environ. Qual.*, v. 43, n. 1, p. 145-154, Jan. 2014.
- PETERSON, J. R.; HAMLETT, J. M. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 34, n. 3, p. 531-544, June 1998.
- PISINARAS, V.; PETALAS, C.; GIKAS, G. D.; GEMITZI, A.; TSIHRINTZIS, V. A. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *J. Desalination*, v. 250, n. 1, p. 274-286, Jan. 2009.
- RIMMER, A.; GIVATI, A.; SAMUELS, R.; ALPERT, P. Using ensemble of climate models to evaluate future water and solutes budgets in Lake Kinneret, Israel. *J. Hydrol.*, v. 410, n. 3-4, p. 248-259, Nov. 2011.
- SANTER, B. D.; WIGLEY, T. M. L.; SCHLESINGER, M. E.; MITCHELL, J. F. B. *Developing Climate Scenarios from Equilibrium GCM Results*. Max-Planck-Institut für Meteorologie. Hamburg, Germany: [s.n.], 1990. (Report, no. 47).
- SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, Oct. 2001.
- SANTOS, C. P. Impactos eco-hidrológicos do uso e ocupação do solo em região semiárida: o caso da bacia do rio Acaraú, CE. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2013.
- SINGH, J.; KNAPP, H. V.; ARNOLD, J. G.; DEMISSIE, M. Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 41, n. 2, p. 343-360, Apr. 2005.
- TIBEBE, D.; BEWKET, W. Surface Runoff and Soil Erosion Estimation Using The SWAT Model In The Keleta Watershed, Ethiopia. *Land Degradation Dev.*, v. 22, n. 6, p. 551-564, Nov./Dec. 2011.
- TUCCI, C. E. M., BRAGA, B. (Org.). *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH. 2003.
- VAGHEFI, S. A.; MOUSAVI, S. J.; ABBASPOUR, K. C.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *Hydrol. Process.*, v. 28, n. 4, p. 2018-2032, 2013. doi: 10.1002/hyp.9747.
- VARANOU, E.; GKOUVATSOU, E.; BALTAS, E.; MIMIKOU, M. Quantity and quality integrated catchment modeling under climate change with use of Soil and Water Assessment Tool model. *J. Hydrol. Eng.*, v. 7, n. 3, p. 228-244, May 2002.
- WANG, G.; YANG, H.; WANG, L.; XU, Z.; XUE, B. Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters. *Hydrol. Process.*, v. 28, n. 3, p. 1032-1042, Jan. 2014.
- Wigley, T. M. L. *MAGICC/SCENGEN 5.3: User Manual* (version 2). Colorado: National Center for Atmospheric Research, 2008.
- WU, Y.; LIU, S.; GALLANT, A. L. Predicting impacts of increased CO₂ and climate change on the water cycle and water quality in the semiarid James River Basin of the Midwestern USA. *Sci. Total Environ.*, v. 430, p. 150-160, July 2012.
- ZABALETA, A.; MEAURIO, M.; RUIZ, E.; ANTIGUEDAD, I. Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, northern Spain. *J. Environ. Qual.*, v. 43, n. 1, p. 235-245, Jan. 2014. doi:10.2134/jeq2012.0209.
- ZHANG, S.; LIU, Y.; WANG, T. How land use change contributes to reducing soil erosion in the Jialing River Basin, China. *Agric. Water Manag.*, v. 133 p. 65-73, Feb. 2014.

Contribuição dos autores:

Erick de Lima Sebadelhe Valerio: Autor principal, participação em todas as etapas do trabalho.

Carlos Ruberto Fragoço Júnior: Co-autor, Orientação e participação da parte intelectual do trabalho (objetivo, planejamento e conclusões).