IMPACTO DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DEMANDAS CONSUNTIVAS NO DESEMPENHO DOS RESERVATÓRIOS DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL

Marx Vinicius Maciel da Silva [1]; Antonio Duarte Marcos Junior [1]; Greicy Kelly da Silva[1]; Mauro Ricardo Roxo Nóbrega[1]; Carlos Eduardo Sousa Lima [2] & Cleiton da Silva Silveira [3]

Resumo – As mudanças climáticas nas próximas décadas podem intensificar eventos extremos, como secas severas. Somados ao possível aumento das demandas por água, podem exercer grandes pressões sobre os hidrossistemas. Para confirmar essa suposição, foi proposto neste estudo um conjunto de cenários para considerar as mudanças climáticas e o crescimento da demanda de consumo de água, com o objetivo de avaliar como cada demanda pode aumentar e seu impacto no desempenho nos quatro principais reservatórios de múltiplo uso do rio São Francisco. Para tanto, foram utilizados cinco modelos climáticos globais lançados recentemente, com dois cenários de projeções das mudanças climáticas, o SSP2-4.5 e o SSP5-8.5. As vazões naturais afluentes e as vazões de retirada foram estimadas para os reservatórios considerando todas as demandas existentes, novas e projetadas. A conjunção de cenários indicou aumento na Evapotranspiração Potencial, uma possível redução significativa na disponibilidade de água, aumento da demanda de consumo, especialmente para irrigação, e na redução do desempenho de todos os reservatórios analisados.

Palavras-Chave – Mudanças Climáticas; Demandas conflitantes; Gestão de Recursos Hídricos.

Abstract– Climate change in the coming decades could intensify extreme events such as severe droughts. Added to the possible increase in water demands, they can exert great pressure on hydrosystems. To confirm this assumption, a set of scenarios to consider climate change and the growth of water consumption demand were proposed in this study, with the aim of evaluating how each demand may increase and its impact on performance in the four main multipurpose reservoirs of the São Francisco river. To this end, five recently launched global climate models were used, with two climate change projection scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The natural affluent and withdrawal flows were estimated for the reservoirs considering all existing, new and projected demands. The conjunction of scenarios indicated an increase in Potential Evapotranspiration, a possible significant reduction in water availability, an increase in consumption demand, especially for irrigation, and a reduction in the performance of all analyzed reservoirs.

Keywords – Climate Change; Conflicting Demands; Water Resources Management.

[1]) Doutorando(a) em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, e-mails: marx.silva@alu.ufc.br, duarte.jr105@gmail.com, greicykellysilvagks@gmail.com e mauro.nobrega@alu.ufc.br
[2]) Mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, e-mail: eduardolima@alu.ufc.br
[3]) Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, e-mail: cleitonsilveira@ufc.br

INTRODUÇÃO

Eventos extremos, como tempestades, secas severas, inundações e queimadas, podem ser intensificadas em diversas regiões do mundo pelas mudanças climáticas nas próximas décadas, é o que indica diversos estudos que analisaram os possíveis cenários futuros baseados nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) utilizando Modelos Climáticos Globais (MCG) do projeto *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), em um horizonte que alcança o ano de 2100 (IPCC, 2014).

As regiões que já possuem histórico de secas recorrentes e prolongadas, como a região Nordeste do Brasil (NEB), podem ter esse problema ainda mais frequentes, com o aumento das temperaturas entre 4º e 5ºC, e possível redução das chuvas com anomalias percentual variando entre -20% e 20% nos cenários mais pessimistas nas próximas décadas (JONG et al., 2018). Com isso, é possível que as vazões naturais afluentes das principais bacias hidrográficas diminuam entre 60% a 90% (JONG et al., 2018; SILVA et al., 2021).

O rio São Francisco é o principal sistema hídrico da região do NEB, sendo responsável pela oferta de água para múltiplos usos (consuntivos e não consuntivos), como o abastecimento humano, a irrigação, a indústria, a navegação e entre outros. Dentre os usos consuntivos, a irrigação vem sendo a demanda preponderante na maioria dos reservatórios que compõe a Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) (SILVA et al., 2021). Além disso, a BHSF desempenha um papel fundamental na geração de energia elétrica, com potencial instalado de 16.551 GWh por ano, correspondendo a 12% do total nacional (ONS, 2019).

Atualmente está sendo concluído um projeto de transferência de água do rio São Francisco para o semiárido nordestino para reduzir a vulnerabilidade às secas e promover o desenvolvimento regional. Essa demanda extra proporcionará água para diversos fins, como consumo humano, animal, irrigação, piscicultura e camarão, em uma área com de cerca de 12 milhões de habitantes (BRASIL, 2004). No entanto, esta nova demanda pode aumentar os conflitos existentes por água, especialmente durante eventos extremos, como na seca recente de 2012 a 2018, quando o abastecimento de água para áreas urbanas foi priorizado de acordo com a lei federal de recursos hídricos, bem como a produção de alimentos com a irrigação, em detrimento a geração de energia hidroelétrica, que foi reduzida de 87,7 % no ano de 2011 para 21% no ano de 2017 da demanda total de energia elétrica da região. Essa carência foi substituída principalmente pela geração termelétrica que passou de 10% em 2011 para 33% em 2017, e com a geração eólica que passou de 2,2% no ano de 2011 para 45,3% no ano de 2017 (SILVA et al., 2021). Todavia, com o aumento da geração termelétrica, há o aumento da emissão de dióxido de carbono (CO_2), que atuam como *feedback* positivo para as mudanças climáticas. Tal fato, deixa claro a importância do nexo entre clima, água, alimento e energia na gestão dos recursos hídricos a longo prazo.

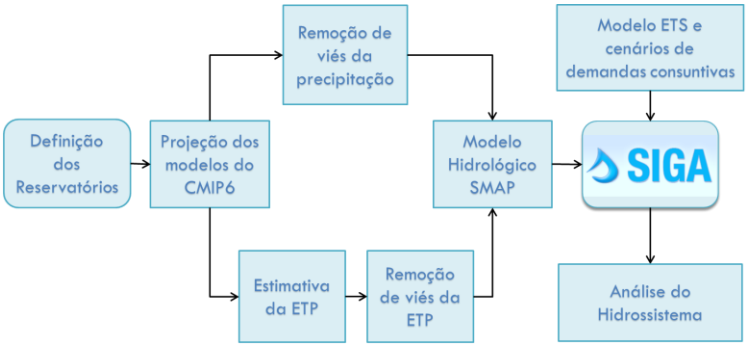
Tais aspectos, associados com a possível previsão do aumento da demanda por água nas próximas décadas, ocasionado pelo crescimento populacional e da riqueza, podem exercer grande pressão nos hidrossistemas da região, influenciando significativamente no abastecimento de água para os diversos usos, dentre eles o consumo humano, a irrigação e a indústria, além da geração de energia hidrelétrica.

Para confirmar essa suposição, foi proposto neste estudo um conjunto de cenários para considerar as mudanças climáticas e o crescimento da demanda de consumo, buscando avaliar como cada demanda pode aumentar e seu impacto no rendimento dos reservatórios, através do cálculo de indicadores, usando vazões naturais afluentes futuros. Embora vários impactos das mudanças climáticas na BHSF tenham sido relatados, os impactos nos reservatórios devido ao clima futuro associado ao uso crescente de consumo raramente são tratados, especialmente usando os MCG referente a sexta fase do CMIP, o CMIP6 lançado recentemente.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia dividiu-se em sete etapas (ver Figura 1), foram elas: (i) Definição das bacias hidrográficas dos reservatórios da BHSF; (ii) obtenção das projeções dos modelos do CMIP6 das variáveis de precipitação, temperaturas do ar em superfície (TAS) máximas, mínimas e médias, e estimativa da Evapotranspiração Potencial (ETP); (iii) na correção estatísticas dos dados de precipitação e ETP dos modelos do CMIP6; (iv) na calibração e validação das vazões simuladas com o modelo hidrológico SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*); (v) na obtenção e projeção das demandas consuntivas com o modelo ETS (*Exponential Smoothing*); (vi) na operação dos hidrossistemas; (vii) na análise dos hidrossistemas, com a obtenção das falhas de atendimento e cálculo dos índices de desempenho dos reservatórios.

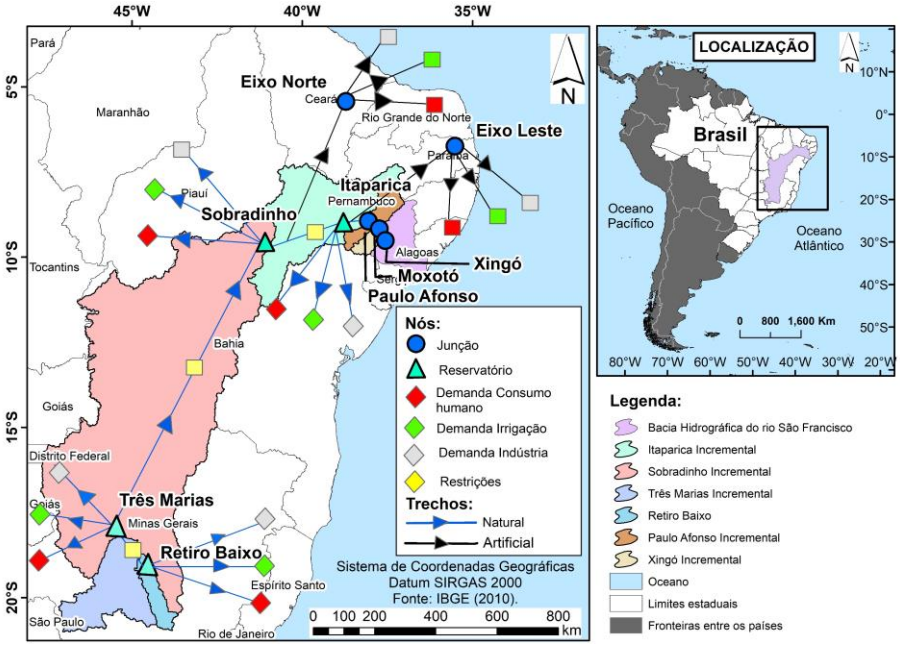
Figura 1 – Etapas metodológicas



Área de Estudo

A região de estudo deste trabalho foi a BHSF, conforme Figura 2.

Figura 2 – Localização da área de estudo com a rede utilizada na operação dos hidrossistemas



Os principais reservatórios são as das bacias hidrográficas das usinas hidrelétricas de Itaparica (também conhecido por Luiz Gonzaga), Sobradinho e Três Marias, que têm volumes úteis de 3.549

hm³, 28.669 hm³ e 15.278 hm³, áreas alagadas de 93.188 km², 467.000 km² e 50.732 km², e capacidade instalada de 1.479,6 MW, 1.050,3 MW, 396 MW, respectivamente (CHESF, 2017). Além desses, o reservatório de Retiro Baixo também possui importância significativa com volume útil de 2.215 hm³, área alagada de 12.187 km² e capacidade instalada de 82 MW. Na Figura 2 também são ilustradas a rede utilizada no SIGA para operações dos reservatórios supracitados.

Dados utilizados e cenários climáticos

Neste estudo, para a calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão SMAP e validação das vazões simuladas, foram utilizados as séries históricas no período de 1991 a 2017 de vazões mensais naturalizadas disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) dos reservatórios da BHSF (ONS, 2019); as precipitações mensais obtidas através das estações pluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA), mediadas através do método de Thiessen; e com as TAS máximos, mínimas e médias do *Climatic Research Unit* (CRU) (HARRIS et al., 2020) foram estimadas a ETP, com o método o método de Hargreaves-Sammani (HARGREAVES; SAMANI, 1985). Os parâmetros e inicializações do modelo SMAP são discorridos nos próximos tópicos.

As informações gerais de Cota-Área-Volume dos reservatórios para utilização no programa SIGA foram obtidos através das empresas que gerenciam as usinas, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), no caso de Três Marias e a Companhia Hidrelétrica de do São Francisco (CHESF), para os demais reservatórios (CEMIG, 2020; CHESF, 2017). Além disso, foram utilizadas as vazões de retirada das demandas consuntivas (irrigação, abastecimento humano e indústria) da Agência Nacional de Água (ANA) no período de 1961 a 2017 para os municípios estaduais do Brasil (ANA, 2019). Para obter as vazões de retirada para cada sub-bacia analisada se fez necessário realizar a soma das demandas de cada município localizada dentro da sub-bacia, conforme é detalhado no trabalho de Silva et al. (2021).

As projeções das mudanças climáticas foram analisadas através dos dados provenientes do CMIP6. Os mesmos são resultados das simulações de cinco MCG: *Canadian Earth System Model 5nd generation* (CanESM5), *Institut Pierre-Simon Laplace-5 Component Models version A-Medium Resolution* (IPSL-CM5A-MR), *Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6* (MIROC6), *Beijing Climate Center—Climate System Model version 2-Medium Resolution* (BCC-CSM2-MR), e *Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0* (MRI-ESM2.0).

O CMIP6 possui o cenário historical (baseado nas observações históricas do clima presente) e cenários futuros que combinam desenvolvimento socioeconômico e tecnológico, denominados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), com cenários futuros das forçantes radiativas, denominado de *Representative Concentration Pathways* (RCP) (GIDDEN et al., 2019). Para este estudo foram utilizados os cenários historical (1971 a 2000, século XX), SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2015 a 2050. O SSP2 é denominado de cenário do "meio da estrada", com crescimento populacional moderado, convergência mais lenta dos níveis de renda entre os países. No SSP5 espera-se um mundo com forte crescimento econômico com o uso de combustíveis fósseis e impactos potencialmente grandes das mudanças climáticas (GIDDEN et al., 2019). Em relação ao RCP, o RCP 4.5 é o cenário de projeção que possui estabilização da forçante radiativa em 4,5 W/m² (antes do final do século XXI) e o RCP8,5 é o mais pessimista entre os cenários RCP, com caminho crescente atingindo 8,5 W/m² em 2100 (IPCC, 2014).

Remoção de viés

Foi utilizado a Função de Distribuição Acumulada Gama para ajustar os dados provenientes dos modelos com os dados observados. Isso é feito, pois os resultados dos modelos climáticos, como

os modelos CMIP6, apresentam erros sistemáticos, principalmente relacionado ao viés. O trabalho de Silva et al. (2021) trazem maiores informações sobre esse método.

Modelo hidrológico SMAP

Foi utilizado neste estudo o modelo hidrológico chuva-vazão SMAP (LOPES; BRAGA; CONEJO, 1982) adaptado para passos de tempo mensais. O mesmo tem o processo de balanço hidrológico baseado em dois reservatórios hipotéticos, sendo um de solo (RSOLO) e um subterrâneo (RSUB). Para maiores detalhes sobre o modelo SMAP consultar Silva *et al*. (2021).

O modelo SMAP possui quatro parâmetros, são eles: a capacidade de saturação do solo (SAT); o expoente relacionado à geração de escoamento superficial (pes); o coeficiente de recarga do aquífero (CREC), que está relacionado com a permeabilidade da zona não saturada do solo; e a constante de recessão (K) do nível d'água do segundo reservatório RSUB, responsável pela geração do escoamento de base. Além de duas inicializações: a taxa de umidade inicial do solo (TUin), que determina o nível inicial do segundo reservatório RSOLO; e o escoamento de base inicial (EBin). A Tabela 1 trazem os valores das inicializações e dos parâmetros calibrados para cada reservatório da BHSF.

Tabela 1 – Inicializações e Parâmetros de calibração do modelo SMAP para os reservatórios da BHSF

Reservatórios	Área (km²)	Período de calibração	TUin	EBin	SAT	Pes	CREC	K
Retiro Baixo	12.187	01/1996 a 12/2006	68,66	54,74	3.240,12	8,34	1,89	0,09
Três Marias	50.732	-	86,36	212,83	1.769,15	8,05	2,6	0,02
Sobradinho	467.000	-	60,7	751,65	1.500,14	5,75	4,10	0,01
Itaparica	93.188	-	97	322	5.000	5,6	0,69	13,25

Neste trabalho a calibração se deu em uma única etapa, na qual os parâmetros SAT, pes e CREC e K do nível RSUB que gera o RSOLO sofreram uma otimização através da ferramenta solver presente na planilha Microsoft Excel, seguido de um refinamento manual por tentativa e erro. Além disso, TUin e EBin foram ajustados manualmente com o coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e *Percent Bias* (PBIAS) (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999).

Modelo ETS e cenários de demandas consuntivas

Para as projeções das demandas consuntivas (período de 2018 a 2050) para as sub-bacias da BHSF, considerou-se três cenários: o cenário 1 com as demandas estáticas, ou seja, considerando a última vazão retirada observada; o cenário 2 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo ETS, considerando o limite inferior do intervalo de confiança de 95% do intervalo de confiança; o cenário 3 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo ETS; e o cenário 4 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo ETS considerando o limite superior de 95% do intervalo de confiança.

O modelo ETS possui três componentes a saber: o Erro, a Tendência e a Sazonal (E, T, S). Essas componentes, por sua vez, podem ser aditivos (A) ou multiplicativos (M) na componente Erro; na sazonal, podem ser A ou M ou nenhuma (N); e na Tendência, podem ser A ou M ou N ou Aditiva amortecida (Ad) ou multiplicativa amortecida (Md). Para este estudo o ETS foi baseado nos métodos descritos por Hyndman; Akram e Archibald (2008), que é disponibilizado por meio do pacote *forecast*

no ambiente do *software* R. Para a escolha do melhor modelo ETS foi utilizado a estatística *Akaike's Information Criterion* (AIC), *Schwarz's Bayesian Information Criterion* (BIC) e AIC com viés removido (AICc).

O SIGA

A gestão da BHSF foi realizada através da operação simulada do seu hidrossistema com uma rede de fluxo no Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água (SIGA). A rede é caracterizada por diferentes demandas e suas prioridades, com os quatro reservatórios de usos múltiplos modelados em série em conjunto com os canais de transposição, conforme foi apresentada na Figura 1. Os eixos Norte e Leste da transposição do rio São Francisco foram considerados como demandas estáticas a serem atendidas pelo sistema.

Além dessas demandas, o hidrossistema também atendeu aos limites de restrições mínimas de vazão nos trechos a jusante dos reservatórios do rio São Francisco, conforme regulamentado pelo operador do sistema, sendo de 100 m^3/s a jusante de Itaparica, de 700 m^3/s a jusante de Sobradinho e de 700 m^3/s a jusante de Três Marias e a minimização do volume evaporado (ONS, 2017).

Durante um período em que haja falha de atendimento às demandas, o SIGA adota um sistema de prioridades, da menor para a maior, para determinar os nós do sistema que sofrerão desabastecimento. Neste estudo a prioridade seguiu a seguinte sequência do maior para o menor: (i) Consumo Humano, (ii) Transposição, (iii) Irrigação e (iv) Indústria. Maiores informações sobre o *software* SIGA podem ser consultadas em Barros et al. (2013).

Análise do hidrossistema

Para as análises estatísticas das projeções da ETP, Precipitação e vazões foi utilizado o cálculo das anomalias percentuais. O mesmo é expresso no trabalho Silva et al. (2021) e neste estudo foram utilizadas as projeções relacionadas com os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050 (século XXI), em comparação com a representação do século XX (1971 a 2000) do *historical*.

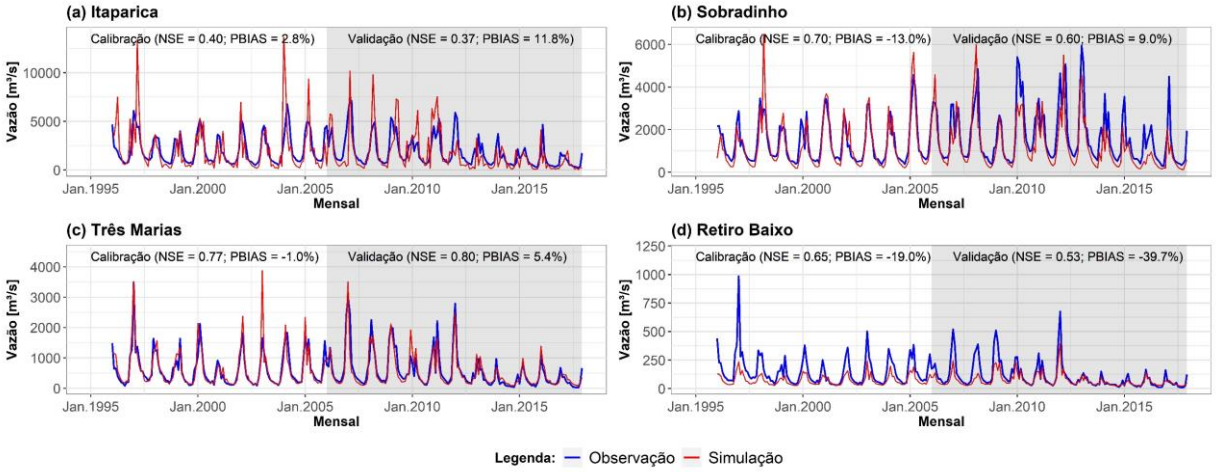
Para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas e demandas consuntivas no desempenho dos reservatórios foram considerados índices propostos por Hashimoto; Stedinger e Loucks (1982), denominados de Confiabilidade e Resiliência. A Confiabilidade é a probabilidade de a série temporal permanecer em estado satisfatório, ou seja, o percentual do tempo em que o sistema opera sem falhas (o sistema apresenta falha quando a oferta é menor do que a demanda). A Resiliência média é definida pela capacidade média de recuperação do sistema de abastecimento de água, passando do estado de falha para o estado satisfatório.

RESULTADOS

A Figura 3 traz os resultados da etapa de calibração (1996 a 2005) e validação (2006 a 2017) das vazões simuladas com o modelo SMAP em comparação com as vazões naturalizadas da ONS. Percebe-se que a maioria dos reservatórios apresentaram boa performance de acordo com a classificação apresentada no estudo de Almeida; Pereira e Pinto (2018), em que o modelo é considerado "muito bom" se $0,75 < NSE < 1,00$ e $PBIAS < \pm 10$, "bom" se $0,60 < NSE \leq 0,75$ e $\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$, e "satisfatório" se $0,36 < NSE \leq 0,60$ e $\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$. A única exceção foi no período de validação do reservatório de Retiro Baixo, que apresentou PBIAS igual a -39%,7%, período no qual o modelo SMAP superestimou as vazões naturalizadas da ONS abaixo do satisfatório. As vazões também foram superestimadas no período de calibração no reservatório de Retiro Baixo, Sobradinho e Três Marias por apresentarem PBIAS negativo de -19%, -13% e -1%, respectivamente; enquanto que no reservatório de Itaparica as vazões foram subestimadas com PBIAS positivo de

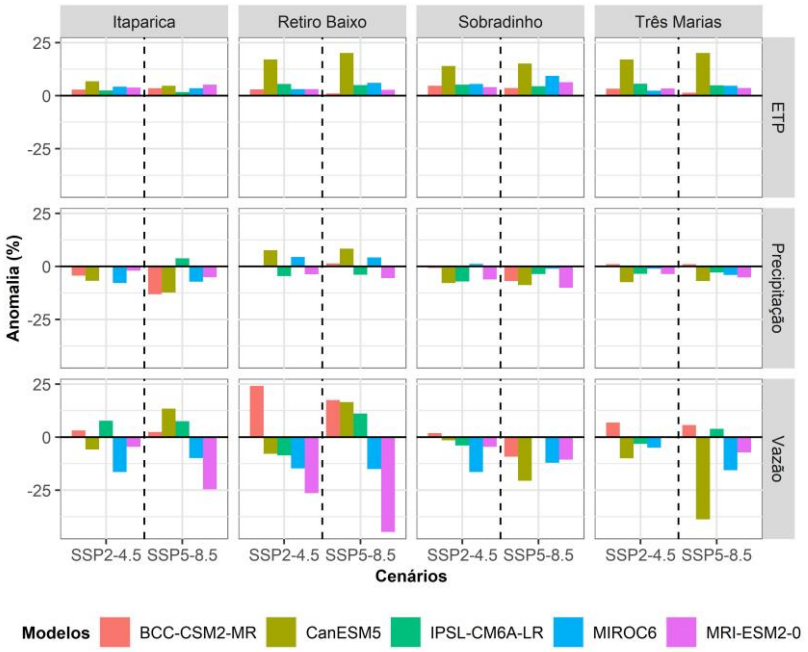
2,8%. No período de validação, com exceção de Retiro Baixo, as vazões simuladas dos reservatórios foram subestimadas. Em relação ao NSE, o reservatório de Itaparica foi o que apresentou os menores coeficientes, tanto na calibração como na validação, com classificação "satisfatório". Enquanto que o reservatório de Três Marias apresentou os maiores coeficientes, com classificação "muito bom".

Figura 3 – Resultados da etapa de calibração (1996 a 2005) e validação (2006 a 2017) das vazões simuladas



A Figura 4 traz as anomalias das variáveis de ETP, precipitação e vazões médias anuais dos modelos do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o período de 2021 a 2050 em comparação com o cenário *historical* (1971 a 2000). Observou-se que todos os modelos indicam aumento da ETP nos dois cenários futuros e para todos os reservatórios analisados. Enquanto que para a precipitação a maioria dos modelos indicaram redução para os reservatórios de Itaparica, Sobradinho e Três Marias, com magnitude próximo de -15% no cenário SSP5-8.5. A exceção foi o modelo IPSL-CM6A-LR que indicou aumento da precipitação para o reservatório de Itaparica no cenário SSP5-8.5 com magnitude próximo de 5%.

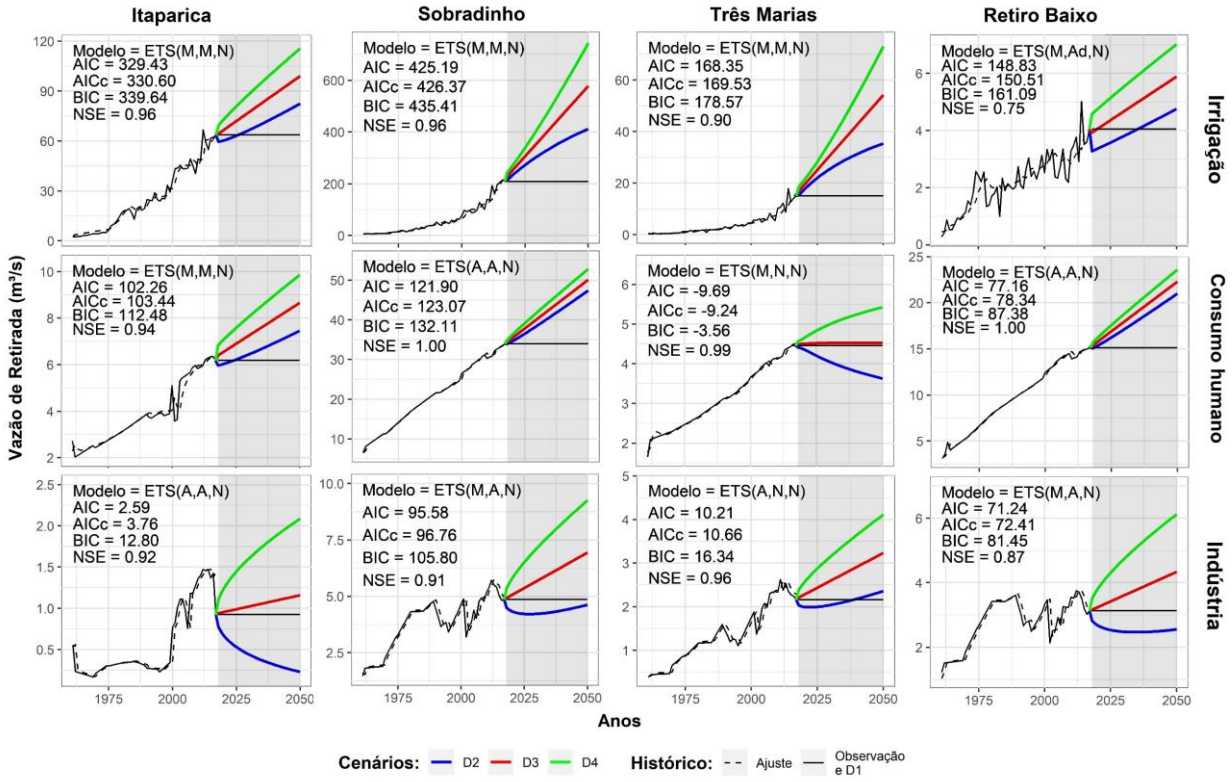
Figura 4 – Anomalia percentual das variáveis de ETP, precipitação e vazão média anual dos modelos do CMIP6



No reservatório de Retiro Baixo houve incerteza em relação a precipitação, com os modelos BCC-CSM2-MR, CanESM5 e IPSL-CM6A-LR indicando aumento; enquanto os modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0 indicam diminuição da precipitação. Para as vazões a maioria dos modelos indicaram redução para os reservatórios de Sobradinho e Três Marias, com as maiores magnitudes no cenário SSP5-8.5. Destaque para o modelo CanESM5 que indicou redução com magnitude próximo de -25% no reservatório de Sobradinho e próximo de -40% no reservatório de Três Marias. Para os demais reservatórios os modelos apresentaram incerteza em relação ao sinal e magnitude das anomalias das vazões médias anuais. Destaque para os modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0 que indicaram redução da vazão para todos os reservatórios.

A Figura 5 traz as séries históricas das vazões consuntivas estimadas (1961 a 2017) e as projeções (2018 a 2050) dos cenários obtidos com o modelo ETS que apresentou o melhor ajuste, conforme os critérios supracitados. Observou-se que todas as demandas apresentaram crescimento exponencial em todos os reservatórios e para todas as demandas consuntivas. A irrigação foi a que apresentou os maiores crescimentos no cenário histórico e nos cenários de projeções. É também a demanda de irrigação que apresenta os maiores valores em três dos quatro reservatórios analisados. A exceção foi o reservatório de Retiro Baixo, no qual a demanda de consumo humano superou as demais.

Figura 5 – Demandas consuntivas históricas (1961 a 2017) e cenários futuros (D1, D2, D3 e D4)



As Figuras 6 e 7 trazem os resultados dos índices de Confiabilidade e Resiliência, respectivamente. Observou-se que todos os modelos, para todos os cenários de mudanças climáticas e na maioria dos cenários de demandas consuntivas (com exceção do cenário D1), indicaram falha ou aumento das falhas em pelo menos uma demanda nas próximas décadas (2021 a 2050) para todos os reservatórios analisadas.

Figura 6 – Índice de confiabilidade dos modelos do CMIP6 para os reservatórios da BHSF. As colunas indicas as médias dos modelos.

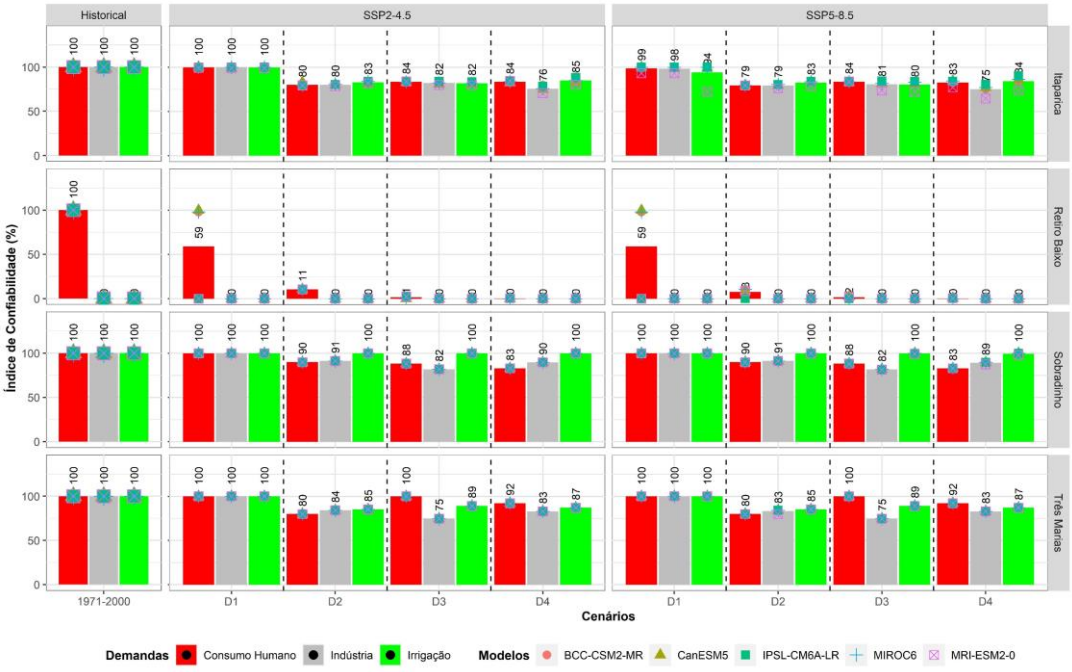
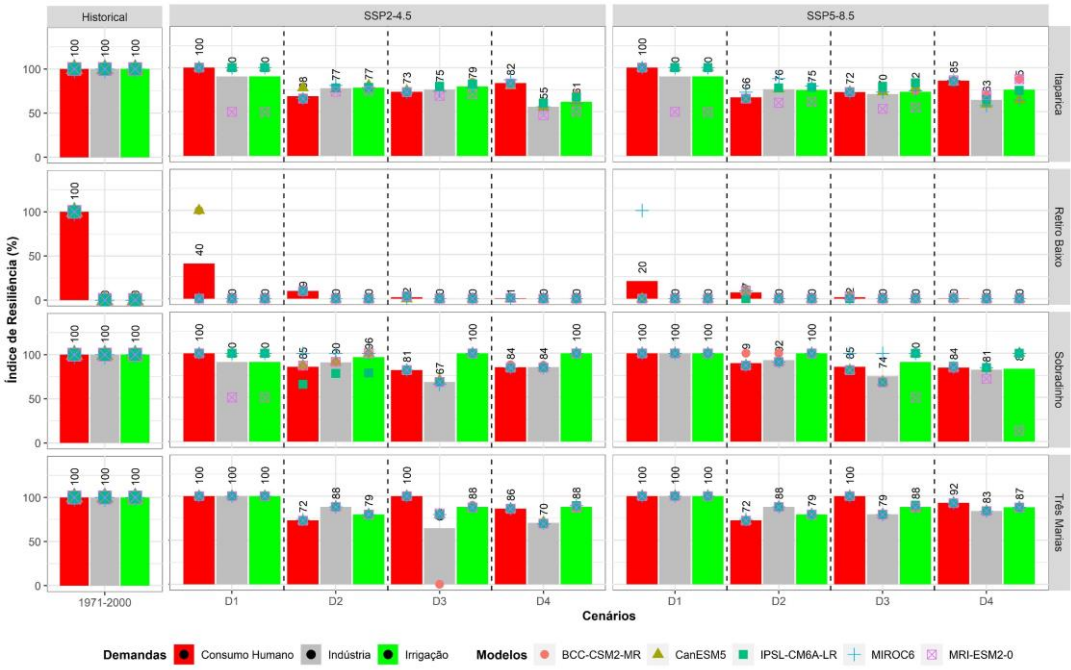


Figura 7 – Índice de resiliência dos modelos do CMIP6 para os reservatórios da BHSF. As barras são as médias do conjunto dos modelos.



No reservatório de Itaparica o índice de Confiabilidade variou na demanda de Consumo humano entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 79% nos cenários D2 e SSP5-8.5; na demanda de irrigação entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 80% nos cenários D3 e SSP5-8.5; na demanda da indústria entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 75% nos cenários D4 e SSP5-8.5. E o índice de Resiliência variou entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e 66% nos cenários D2 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5; na demanda de irrigação entre 90%, nos cenários D1 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e 61% nos cenários D4 e SSP2-4.5; na demanda da indústria entre 90%, nos cenários D1 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e 55% nos cenários nos cenários D4 e SSP2-4.5.

No reservatório de Sobradinho o índice de Confiabilidade variou na demanda de Consumo humano entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 83% nos cenários D4 e SSP5-8.5; na demanda de irrigação apresentou próximo de 100% em todos os cenários analisados; na demanda da indústria entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 82% nos cenários D3 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5. E o índice de Resiliência variou entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e 84% nos cenários D4 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5; na demanda de irrigação entre próximo de 100%, nos cenários D1 e SSP5-8.5, e 82% nos cenários D4 e SSP5-8.5; na demanda da indústria entre próximo de 100%, nos cenários D1 e SSP5-8.5, e 67% nos cenários nos cenários D3 e SSP2-4.5.

No reservatório de Três Marias o índice de Confiabilidade variou na demanda de Consumo humano entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 80% nos cenários D2 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5; na demanda de irrigação entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 83% nos cenários D3 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5; na demanda da indústria entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5, e 75% nos cenários D3 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5. E o índice de Resiliência variou entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e 72% nos cenários D2 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5; na demanda de irrigação entre 100%, nos cenários D1 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e 79% nos cenários D2 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5; na demanda da indústria entre 90%, nos cenários D1 e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e 70% nos cenários nos cenários D4 e SSP2-4.5.

O reservatório de Retiro Baixo foi o que apresentou os menores índices, com 0% para as demandas de irrigação e indústria nos dois índices, e a demanda de Consumo humano apresentou valor médio do índice de Confiabilidade menor que 60%, e menor que 50% para o índice de Resiliência.

CONCLUSÃO

Este trabalho analisou um conjunto de cenários para considerar as mudanças climáticas e o crescimento da demanda, buscando avaliar como cada demanda pode aumentar e seu impacto no desempenho dos reservatórios. Todos os reservatórios apresentaram índices de 100% no cenário *historical*. Foi encontrado uma indicação do aumento da ETP para todos os reservatórios da BHSF para os cenários futuros. Para o reservatório de Itaparica esse aumento foi somado a possível redução das chuvas com anomalia de até -13%, de acordo com os cenários e modelos mais pessimistas. Todavia, houve incerteza dos modelos em relação as anomalias das vazões. Tal fato pode estar relacionado com o baixo NSE obtido durante a calibração e validação do modelo SMAP. Mesmo com essa incerteza, que podem ter suavizado o impacto no rendimento do reservatório, pôde observar impactos significativos no atendimento as demandas consuntivas, com falhas que levaram a redução de até 79%, 80% e 75% para as demandas de Consumo humano, Irrigação e Indústria, respectivamente. O impacto foi ainda maior na Resiliência do reservatório, com redução de até 66%, 61% e 55% para as demandas de Consumo humano, Irrigação e Indústria, respectivamente. No reservatório de Sobradinho a maioria dos modelos indicaram redução das chuvas, e como consequência também houve redução das vazões. Além disso, com exceção da irrigação que não apresentou reduções significativas, o índice de Confiabilidade reduziu em até 83% e 82% para as demandas de Consumo humano e Indústria, respectivamente. Houve redução no índice de Resiliência para todas as demandas em 84%, 82% e 67%. O reservatório de Três Marias apresentou reduções nos rendimentos, com até 80%, 83% e 75% para o Consumo humano, Irrigação e Indústria referente ao índice de Confiabilidade; enquanto que o índice de Resiliência apresentou redução de até 72%, 79% e 70%. O reservatório de Retiro Baixo foi o que apresentou as maiores reduções e os menores índices, com a demanda de Consumo humano apresentando índice de Confiabilidade menor que 60%, e menor que 50% para o índice de Resiliência.

AGRADECIMENTOS A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo auxílio financeiro; e a Universidade Federal do Ceará (UFC), através do Doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), pelo apoio institucional e logístico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. A.; PEREIRA, S. B.; PINTO, D. B. F. "*Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin"*. Engenharia Agricola, 38(1), pp. 55–63, 2018.

ANA. "*Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil"*. pp. 75, 2019.

BARROS, F. V. F. et al. "*The development and application of information system for water management and allocation (SIGA) to a negotiable water allocation process in Brazil"* in Anais do World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future - Proceedings of the 2013 Congress, n. August 2015, pp. 1308–1316, 2013.

BRASIL. "*Projeto de Integração do São Francisco"*. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ProjetoRioSaoFrancisco/ArquivosPDF/documentostecnicos/RIMAJULHO2004.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

CEMIG. "*Usina Hidrelétrica de Três Marias"*. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/>.

CHESF. "*Companhia hidroelétrica de são francisco (CHESF)"*. Disponível em: <https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>. Acesso em: 1 jan. 2020.

GIDDEN, M. J. et al. "*Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century"*. Geoscientific Model Development, 12(4), pp. 1443–1475, 2019.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. "*Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration"*. Journal of Hydrologic Engineering, 4(2), pp. 135–143, 1999.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. "*Reference Crop Evapotranspiration from Temperature"*. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), pp. 96–99, 1985.

HARRIS, I. et al. "*Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset"*. Scientific Data, 7(1), pp. 1–18, 2020.

HYNDMAN, R. J.; AKRAM, M.; ARCHIBALD, B. C. "*The admissible parameter space for exponential smoothing models"*. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 60(2), p. 407–426, 2008.

IPCC. "*Summary for policymakers. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change"*, v. 19-25(1-9), pp. 3–22, 2014.

JONG, P. et al. "*Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability"*. Science of the Total Environment, 634(9), pp. 1540–1553, 2018.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. "*SMAP - A Simplifi ed Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology"*. Water Resourses Publications, pp. 1982, 1982.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. "*River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles"*. Journal of Hydrology, 10(3), pp. 282–290, 1970.

ONS. "*Plano de Operação Energética 2019-2023"*. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/PEN_Executivo_2019-2023.pdf>.

SILVA, M. V. M. et al. "*Projection of Climate Change and Consumptive Demands Projections Impacts on Hydropower Generation in the São Francisco River Basin, Brazil"*. Water, 13(3), pp. 332, 2021.