

IV-185 – SENSIBILIDADE DO BALANÇO HÍDRICO DE RESERVATÓRIOS COM REGULARIZAÇÃO AO CLIMA

Pedro Gustavo Câmara da Silva⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestrando em Engenharia Sanitária pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPgESA/UFRN).

Jonathan Mota da Silva

Físico com Iniciação Científica em modelagem regional climática pela Universidade Federal do Ceará (UECE). Doutor em Ciências Atmosféricas na área de modelagem hidrometeorológica e relações biosfera-atmosfera pelo Inst. de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG/USP).

Arthur de Souza Antunes Suassuna

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Adelena Gonçalves Maia

Engenheira Civil pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP).

Endereço⁽¹⁾: Av. Sen. Salgado Filho, S/N – Lagoa Nova - Natal - RN - CEP: 59078-970 – Brasil – e-mail⁽¹⁾: pedrogustavo@ct.ufrn.br.

RESUMO

As peculiaridades hidrológicas da região semiárida brasileira têm influência direta na alocação/distribuição de água para os diversos usos demandados para os reservatórios superficiais dessa região. Com altas taxas de evaporação e precipitação irregular, esses sistemas comumente apresentam incompatibilidade para abastecimento, uma vez que os volumes de precipitação nem sempre são suficientes para que os reservatórios atinjam um nível de água satisfatório para as vazões de saída. A possibilidade de entendimento da influência das forçantes climáticas, como precipitação e evaporação, na dinâmica de utilização de água dos reservatórios pode guiar uma gestão mais aprimorada frente às alterações climáticas e aos cenários de crescente demanda. Nesse sentido, a análise de sensibilidade (índice SI) ao clima amparada pela realização de simulações de balanço hídrico possibilita um melhor entendimento das trocas espelho d'água-atmosfera. Assim, para o presente estudo, foram selecionados quatro reservatórios situados na região semiárida brasileira, sendo dois no estado do Rio Grande do Norte (RN) e dois no estado da Paraíba (PB). Os reservatórios estudados são o Armando Ribeiro Gonçalves (RN), Dourado (RN), São Gonçalo I (PB) e Coremas (PB), que foram escolhidos com base na relação entre vazão regularizada e vazão afluente, e levando em consideração suas distribuições na porção alta e baixa da bacia hidrográfica dos rios Piancó-Piranhas-Açu, na qual estão inseridos. Para o balanço hídrico, considerou-se dois períodos de dados de evaporação e precipitação: o primeiro de 1961-1990, de acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), e o segundo de 1980-2013, da base de dados Xavier (2016), como forma de comparar o comportamento dos reservatórios a estes dois tipos de dados. Foi verificado que os reservatórios menos sensíveis às forçantes climáticas são São Gonçalo I e Armando Ribeiro Gonçalves e os reservatórios mais sensíveis são Coremas e Dourado.

PALAVRAS-CHAVE: Reservatórios, Análise de sensibilidade ao clima, Forçantes climáticas.

1. INTRODUÇÃO

A região semiárida brasileira apresenta significativa variabilidade hidrológica inter-anual. O gerenciamento de recursos hídricos é complexo, especialmente devido às condições de tempo extremas, como altas taxas de evaporação e irregular precipitação em tempo e espaço (Nunes, Galvão e Rego, 2016). Devido a essas características, os reservatórios dessa região sofrem com a incompatibilidade de entradas e saídas de água para abastecimento dos múltiplos usos.

O entendimento do comportamento dos reservatórios às variáveis componentes dominantes do balanço de água (Xavier, 2016) dá suporte à tomada de decisão nesses sistemas, uma vez que a escassez, impulsionada pelas trocas atmosfera-massa líquida, e a abundância de água, possibilitada pelas vazões afluentes aos reservatórios, estão diretamente relacionadas com a sazonalidade da precipitação e dos volumes perdidos por evaporação, em razão das altas temperaturas verificadas nas regiões semiáridas.

A gestão eficiente dos reservatórios dessa região tem sido cada vez mais necessária, tanto frente às mudanças climáticas, quanto ao aumento progressivo das demandas. Por isso, estudos que tem por finalidade a análise das variáveis climáticas e como estas afetam o comportamento hídrico de reservatórios têm ganhado espaço (Xavier, 2016; Bueno, Mello e Alves, 2016; Majidi et al., 2015).

Nesse sentido, o presente trabalho tem o objetivo de verificar a sensibilidade do balanço hídrico de reservatórios ao clima, levando em consideração a variabilidade da evaporação e precipitação.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em quatro reservatórios localizados na bacia hidrográfica dos rios Piancó-Piranhas-Açu (43.683 km²), que abrange os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba (Fig.1) e ocupa ~ 15% para porção semiárida brasileira do território da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental.

A seleção dos reservatórios foi baseada em dois critérios: (1) a localização geográfica, onde foram escolhidos reservatórios no Alto e no Baixo rio Piancó-Piranhas-Açu, a fim de abranger o padrão espacial das chuvas na bacia, que tem relação com a topografia; (2) a intensidade da demanda hídrica em relação à vazão afluente dos reservatórios, considerada aqui de maneira geral, como sendo alta (A) ou baixa (B) conforme as equações 1 e 2, respectivamente. Os dados de vazão afluente e vazão regularizada foram obtidos da Agência Nacional de Águas, ANA (2016, 2017). Desse modo, foram selecionados quatro reservatórios, dois no Alto (São Gonçalo I e Coremas) e dois no Baixo (Dourado e Armando Ribeiro Gonçalves) (Figura 1).

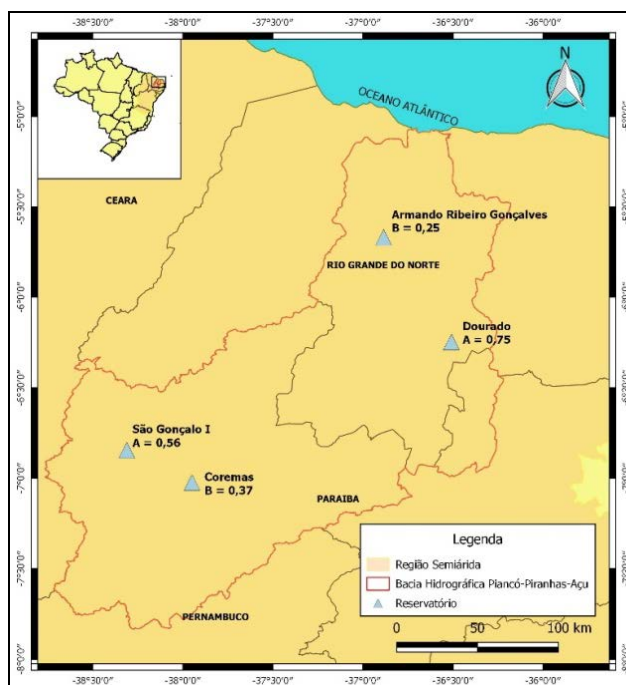


Figura 1. Localização dos reservatórios selecionados no Alto (São Gonçalo I e Coremas) no e Baixo (Dourado e Armando Ribeiro Gonçalves) rio Piancó-Piranhas-Açu e suas respectivas intensidades de demanda hídrica (alta (A) ou baixa (B)).

$$A = \frac{Vazão_{regularizada}}{Vazão_{afluente}} > 0,50 \text{ (alta demanda)} \quad (\text{equação 1})$$

$$B = \frac{Vazão_{regularizada}}{Vazão_{afluente}} < 0,50 \text{ (baixa demanda)} \quad (\text{equação 2})$$

2.2. Dados climatológicos

Foram utilizados dados de duas fontes: 1. ANA (2017), que considera a evaporação obtida a partir das Normais Climatológicas (1961-1990) e precipitação obtida de 5.381 estações pluviométricas e análise de consistência com extensão de séries e ajuste entre os anos de 1913 e 2012; 2. Dados selecionados da base de Xavier (2016), com séries de 1980 a 2013 (34 anos). Esses dados apresentam periodicidade diária e foram obtidos a partir de medições em estações climatológicas terrestres brasileiras (INMET, ANA e DAEE/SP), sendo 3.625 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas (Xavier, 2016). De acordo com Xavier (2016), os dados possuem alta precisão uma vez que foram coletados levando em consideração grids de resolução espacial de 0,25°. O cálculo da evaporação foi realizado através da metodologia Penman considerando cinco variáveis, sendo elas Temperatura Máxima (°C), Temperatura Mínima (°C), Radiação solar (MJ/m²), Umidade Relativa do Ar (%), Velocidade do Vento (m/s) (Shuttleworth, 2012). Também foram coletados dados de precipitação da base Xavier (2016).

2.3. Balanço Hídrico

A análise da capacidade de regularização dos reservatórios pode ser realizada com modelo de balanço hídrico de reservatório conforme a equação 3.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t + P_t - Y_t - V_t \quad (\text{equação 3})$$

Em que, S_t – volume armazenado (m³); Q_t – volume afluente (m³); E_t – volume evaporado (m³); P_t – volume precipitado (m³); Y_t – volume liberado (m³); V_t – volume vertido (m³).

Com base nas características do reservatório (curva cota-volume-área), vazão de entrada no reservatório e vazão demandada (obtidos de ANA (2016, 2017)), o balanço hídrico de reservatório foi simulado mensalmente durante 100 anos (1913-2012) para quatro condições climáticas (Tabela 1).

A sensibilidade do balanço hídrico de reservatório ao clima foi verificada para três condições climáticas em comparação ao balanço hídrico de reservatório calculado a partir de uma climatologia de precipitação e evaporação (Tabela 1). Esta simulação serviu como base (SimBase) para verificar a sensibilidade do volume armazenado pelo reservatório ao clima. As outras simulações foram realizadas pela alteração unicamente da precipitação (SimPrec) ou evaporação (SimEvap) e pela alteração de ambas as variáveis climáticas (SimPrecEvap) conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Descrição das simulações realizadas.

BALANÇO HÍDRICO (BH)	SIGLA	DESCRIÇÃO dos forçantes climáticos utilizados no cálculo do BH dos reservatórios
Balanço hídrico Base	SimBase	Climatologia (1961-1990) da precipitação e evaporação da ANA
Balanço hídrico com mudança na Precipitação	SimPrec	Precipitação mensal do período de 1980-2013 (Xavier, 2016) e evaporação climatológica (1961-1990) da ANA.
Balanço hídrico com mudança na Evaporação	SimEvap	Evaporação dos dados Xavier (2016)
Balanço hídrico com mudança na precipitação e evaporação	SimPrecEvap	Precipitação e evaporação dos dados Xavier (2016)

2.4. Análise de Sensibilidade (SI)

A análise de sensibilidade foi adaptada de Binley et al. (1991), segundo as equações 4 e 5, onde consideramos o efeito da mudança no volume armazenado calculado pelo modelo, devido à mudança de uma variável por vez ($SI_{X,Y}$), precipitação ou evaporação, ou o efeito combinado da mudança destas duas variáveis ($SI_{E,P,Y}$) no volume armazenado. Em outras palavras, $SI_{X,Y}$ e $SI_{E,P,Y}$ é a sensibilidade do modelo de balanço hídrico de reservatório em relação a SimBase quando este foi forçado variando unicamente uma forçante climática (precipitação ou evaporação) ou quando o modelo foi forçado variando ambas as forçantes climáticas (precipitação e evaporação), respectivamente.

$$SI_{X,V} = \text{mediana} \left(\frac{\left| \frac{V_t^B - V_t^X}{V_t^B} \right|}{\left| \frac{X_t^B - X_t^X}{X_t^B} \right|} \right) \cdot 100 \quad (\text{equação 4})$$

$$SI_{E,P,V} = \text{mediana} \left(\frac{\left| \frac{V_t^B - V_t^{E,P}}{V_t^B} \right|}{\left(\left| \frac{E_t^B - E_t^X}{E_t^B} \right| + \left| \frac{P_t^B - P_t^X}{P_t^B} \right| \right)} \right) \cdot 100 \quad (\text{equação 5})$$

Em que, t – tempo (mês); X – precipitação (P) ou evaporação (E) (mm mês⁻¹); V – volume do reservatório (mm mês⁻¹); V_t^B – volume do reservatório no tempo t da simulação base (B) (mm mês⁻¹); V_t^X – volume do reservatório no tempo t com precipitação ou evaporação Xavier (2016) (mm mês⁻¹); $V_t^{E,P}$ – volume do reservatório no tempo t com evaporação e precipitação Xavier (2016) (mm mês⁻¹).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo geral, a precipitação utilizada nas simulações (P_Clim e P_Obs) possuem sazonalidade semelhantes para os quatro reservatórios avaliados, onde o período mais úmido correspondeu aos meses de jan-mai e os meses mais secos de jul-nov. A precipitação dos reservatórios ARG e DOU da base de dados do Xavier (2016) no período mais úmido foi superior à da base da ANA, com médias chegando ~ 150 mm mês⁻¹. Já para os reservatórios COR e SG, o mesmo conjunto de dados foi ligeiramente inferior, em média ~ 170 mm mês⁻¹ (Figura 2). Por outro lado, a evaporação potencial utilizada nas simulações (E_Clim e E_Obs) apresentaram sazonalidades distintas. Percebe-se que as médias foram maiores para os dados calculados com a metodologia Penman (Figura 2). A evaporação máxima, nesse caso, foi no mês de outubro, para todos os reservatórios, com média acima dos 300 mm mês⁻¹. A menor evaporação ocorreu em junho, ficando em torno de 250 mm mês⁻¹.

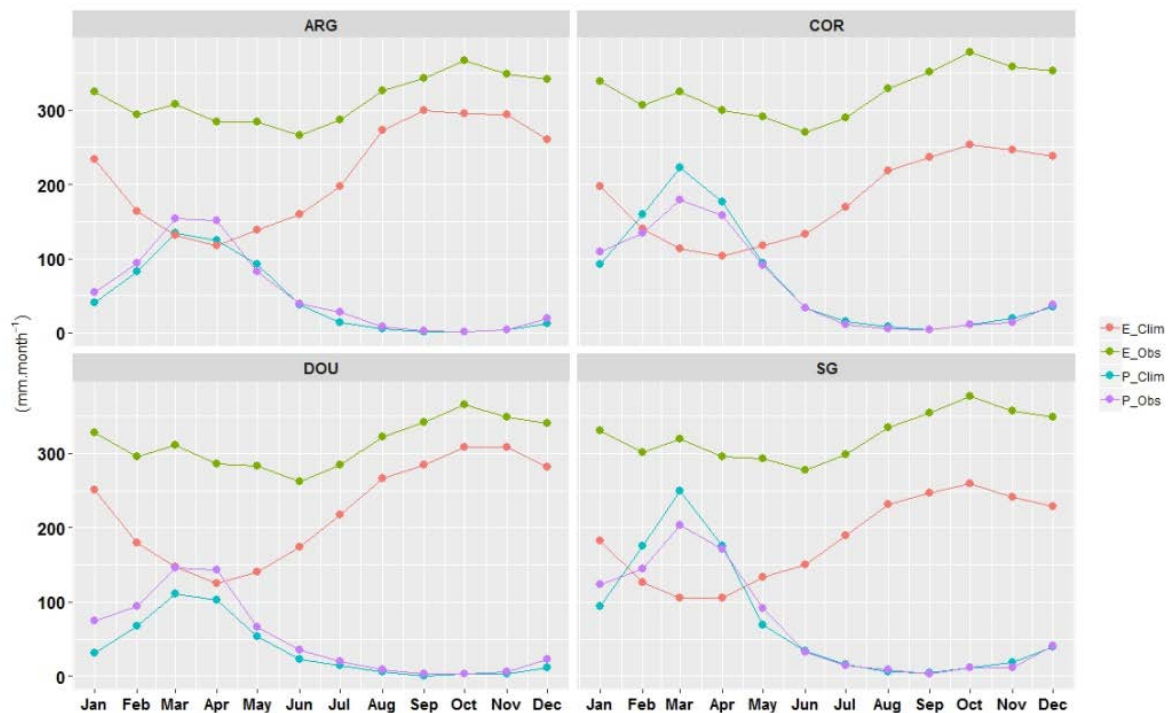


Figura 2. Ciclo anual da precipitação e evaporação potencial calculados da climatologia média da ANA de 1961-1990 (P_Clim e E_Clim) e de observações de superfície de 1980-2013 (P_Obs e E_Obs) próximos aos reservatórios: Armando Ribeiro Gonçalves (ARG), Coremas (COR), Dourado (DOU) e São Gonçalo (SG).

A partir das simulações foi possível notar como os reservatórios respondem em termos de armazenamento às mudanças nas variáveis meteorológicas (Figura 3). Em relação à simulação base (V_{CLIM}), os reservatórios ARG, DOU e SG apresentam ligeiro aumento no volume armazenado, ao passo que o reservatório COR apresentou decréscimo no volume armazenado, quando comparamos à simulação SimPrec. Em relação à simulação SimEvap, ARG e DOU apresentaram os volumes mensais abaixo das demais simulações; COR se sobressai à simulação SimPrecEvap e o reservatório SG permanece com volumes praticamente inalterados. Já para análise da simulação SimPrecEvap, o reservatório COR apresentou os menores volumes armazenados, que nas demais simulações; SG permanece praticamente inalterado; e os reservatórios ARG e DOU apresentam uma redução do volume armazenado expressiva em relação à SimBase.

Esses resultados mostram que os reservatórios respondem de forma distinta ao clima, possuindo assim diferentes sensibilidades. A sensibilidade dos reservatórios pode estar relacionada também às características físicas do reservatório (área, forma do reservatório, etc.). Porém tais parâmetros, embora contribuam para tanto, são sobrepostos ao padrão do clima (resultado não apresentado). Para as mesmas condições físicas, variando as forçantes climáticas (precipitação e evaporação potencial), verificou-se a sensibilidade dos reservatórios, reportadas na Tabela 4, a partir do desenvolvimento de um índice de sensibilidade (SI) aplicado a todos os reservatórios e simulações realizadas.

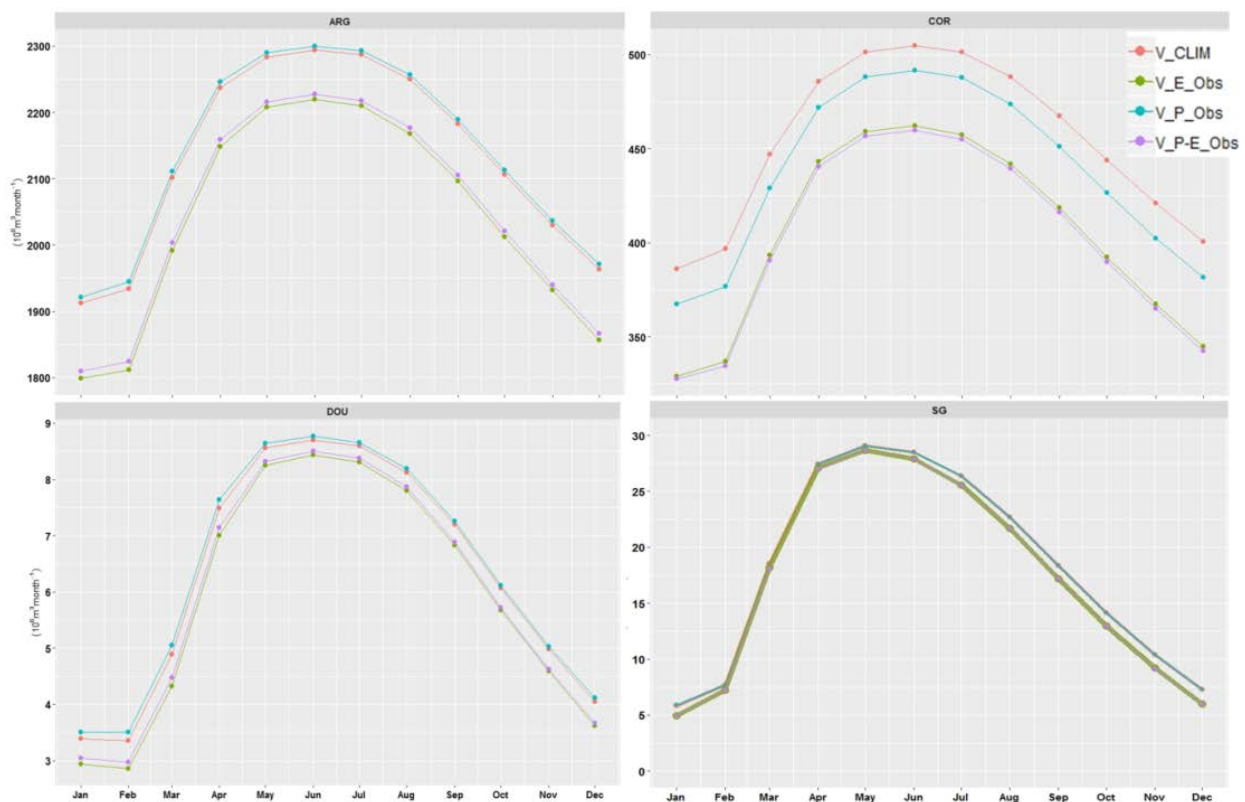


Figura 3. Ciclo anual do volume armazenado (V) dos reservatórios Armando Ribeiro Gonçalves (ARG), Coremas (COR), Dourado (DOU) e São Gonçalo (SG) obtidos pelo balanço hídrico calculado para quatro combinações de precipitação e evaporação: (1) V_{CLIM} , climatologia média da ANA (1961-1990) de precipitação e evaporação; (2) V_{P_Obs} , evaporação climatológica da ANA (1961-1990) e precipitação mensal (1980-2013) de estações de superfície; (3) V_{E_Obs} , precipitação climatológica da ANA (1961-1990) e evaporação mensal (1980-2013) de estações de superfície; e (4) V_{P-E_Obs} , precipitação e evaporação mensal de estações de superfície.

Os reservatórios foram classificados conforme a Tabela 4, após os cálculos da sensibilidade (Tabela 5).

Tabela 4. Classificação da sensibilidade dos reservatórios.

Classes	SI (%)	Sensibilidade
I	$0 < SI \leq 5\%$	Fraca
II	$5\% < SI \leq 20\%$	Moderada
III	$20\% < SI \leq 30\%$	Forte

Tabela 4. Sensibilidade do balanço hídrico dos reservatórios Armando Ribeiro Gonçalves (ARG), Coremas (COR), Dourado (DOU) e São Gonçalo (SG) a forçante climática.

Reservatorio	SI (%)	Forçante climática utilizada no Bal. Hídrico do Reservatório		
		Sigla	Precipitação (Prec.)	Evaporação (Evap.)
arg	1.7	BH_Prec	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. climatologica (1961-1990)
arg	12	BH_Evap	Prec. climatologica (1961-1990)	Evap. mensal (1980-2013)
arg	9.4	BH_PrecEvap	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. mensal (1980-2013)
cor	30	BH_Prec	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. climatologica (1961-1990)
cor	16	BH_Evap	Prec. climatologica (1961-1990)	Evap. mensal (1980-2013)
cor	24	BH_PrecEvap	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. mensal (1980-2013)
dou	2.4	BH_Prec	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. climatologica (1961-1990)
dou	21	BH_Evap	Prec. climatologica (1961-1990)	Evap. mensal (1980-2013)
dou	11	BH_PrecEvap	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. mensal (1980-2013)
sg	0.53	BH_Prec	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. climatologica (1961-1990)
sg	7.7	BH_Evap	Prec. climatologica (1961-1990)	Evap. mensal (1980-2013)
sg	9.9	BH_PrecEvap	Prec. mensal (1980-2013)	Evap. mensal (1980-2013)

A sensibilidade dos reservatórios ARG, DOU e SG à mudança na precipitação mensal foi fraca, ao passo que o reservatório COR apresentou uma forte sensibilidade à mudança desta variável, com SI igual a 30%. Já para as mudanças na evaporação potencial mensal, este reservatório mais os reservatórios ARG e DOU tiveram uma moderada sensibilidade; enquanto o reservatório SG obteve uma fraca sensibilidade. Para às mudanças na precipitação e evaporação potencial mensais ao mesmo tempo, os reservatórios ARG e SG tiveram uma moderada sensibilidade, enquanto os reservatórios DOU e COR apresentaram uma forte sensibilidade, com SI iguais a 11 e 24%, respectivamente.

CONCLUSÃO

O reservatório menos sensível às forçantes climáticas foi o São Gonçalo I (SG), com SI variando de moderado a fraco, localizado no alto da bacia hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu. O reservatório Coremas (COR), também localizado no alto da bacia, foi o reservatório mais sensível as mudanças no clima, sendo este, o reservatório mais vulnerável as mudanças nos padrões climáticos, enquanto o São Gonçalo o reservatório menos vulnerável. Os reservatórios Armando Ribeiro Gonçalves (ARG) e Dourado (DOU), localizados na porção baixa da bacia, na qual as médias de precipitação são mais baixas, foram os reservatórios que apresentaram uma sensibilidade aproximadamente moderada, sendo que o reservatório de Dourado teve uma sensibilidade maior as alterações no clima do que o Armando Ribeiro Gonçalves.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação: Anexo B. ANA Brasília – DF, 2017, 140 p.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Plano de Recursos Hídricos Piancó-Piranhas-Açu: Plano Executivo. ANA Brasília – DF, 2016, 167 p.
3. BINLEY, A M., BEVEN, K.J., CALVER, A, WATTS, L.G. Changing responses in hydrology - assessing the uncertainty in physically based model predictions. Water Resour. Res. 1991. doi:10.1029/91wr00130
4. BUENO, E. O., MELLO, C. R., ALVES, G.J., Evaporation from Camargos hydropower plant reservoir: water footprint characterization. RBRH, Porto Alegre, vol. 21, n. 3, p. 570-575, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616021>.
5. MAJIDI, M.; ALIZADEH, A.; FARID, A.; VAZIFEDOUST, M. Estimating Evaporation from Lakes and

- Reservoirs under Limited Data Condition in Semi-Arid Region. *Water Resour Manage* (2015) 29: 3711. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1025-8>.
6. NUNES, T. H. C.; GALVÃO, C. O.; RÊGO, J. C. Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges. *RBRH*, Porto Alegre, vol. 21, n. 3, p. 493-501, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011615146>.
 7. SHUTTLEWORTH, W.J. *Terrestrial Hydrometeorology*, Terrestrial Hydrometeorology. 2012. doi:10.1002/9781119951933.
 8. XAVIER, A.C., KING, C.W., SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *Int. J. Climatol*, 2016. doi:10.1002/joc.4518.