



Campos dos Goytacazes/RJ

SEGURANÇA HÍDRICA E ENERGÉTICA NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS – 1: EXTREMOS HIDROLÓGICOS

Ana Carolina da Encarnação Paiva¹; Javier Tomasella¹; Minella Alves Martins¹; Daniel Andres Rodriguez² & Erica Acioli Canamary¹

RESUMO – A intensificação de extremos climáticos, o aumento da demanda, e a falta de um planejamento integrado dos recursos hídricos no Brasil vêm se tornando mais evidente ano após ano. No ano de 2014, deparamo-nos com cheias nas regiões Norte e Sul, enquanto o Sudeste e Nordeste sofrem com deficiências hídricas severas. A bacia do rio Paraíba do Sul também apresentou níveis muito abaixo do normal, caracterizando uma estiagem extrema. O objetivo deste trabalho foi avaliar a segurança hídrica desta bacia utilizando modelagem hidrológica, considerando os efeitos das mudanças de uso e cobertura da terra e no clima, o aumento da demanda nos centros urbanos e as transposições. As análises de extremos hidrológicos indicam uma redução nas vazões no primeiro período de simulação e um aumento no segundo. Todos os cenários apontam um aumento na intensidade e na frequência dos períodos de estiagens comprometendo ainda mais os usos das águas da bacia.

ABSTRACT– The intensification of climate extremes, the increase in demand, and the lack of an integrated planning of water resources in Brazil are becoming more evident lately. In 2014, there we flood in the North and South regions, while the Southeast and Northeast suffer from severe water deficiencies. The Paraíba do Sul River basin also presented levels well below normal, characterizing an extreme drought. The objective of this work was to evaluate the water security of this basin using hydrological modeling, considering the effects of changes in land use and land cover and on climate, the increase in demand in urban centers and transpositions. Analyzes of hydrological extremes indicate a reduction in flows in the first simulation period and an increase in the second. All scenarios point to an increase in the intensity and frequency of periods of drought, further compromising the use of water in the basin.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológica, extremos hidrológicos.

INTRODUÇÃO

Em decorrência do crescimento populacional, o aumento de tamanho e da densidade dos aglomerados urbanos têm contribuído para o aumento dos conflitos pelo uso dos recursos hídricos e para a piora da qualidade da água. Além disso, o ano hidrológico de 2014, o Sudeste do Brasil sofreu

1) INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Av. dos Astronautas 1758, carolina.paiva@inpr.br; javier.tomasella@inpe.br; minella.martins@gmail.com; erica.canamary@inpe.br;

2) UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro: Av. Pedro Calmon, 550 – Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ; daniel.andres@coc.ufrj.br



Campos dos Goytacazes/RJ

com déficits pluviométricos severos (Nobre *et al.* 2016), trazendo impactos duradouros na segurança hídrica, alimentar e energética (Cunha *et al.* 2019). Durante essa estiagem, foram registradas as menores vazões da série de 80 anos em vários rios da região, comprometendo o abastecimento de água para a região metropolitana de São Paulo. Como consequência da seca de 2014 foi construída uma nova transposição, do reservatório Jaguari para o Sistema Cantareira, para aumentar o abastecimento de água para a região metropolitana de São Paulo em períodos de escassez.

O aumento da demanda de recursos hídricos na Bacia do rio Paraíba do Sul (BRPS) tanto para usos consuntivos (agrícolas, humanos e industriais) quanto não consuntivos (geração de energia), traz preocupações crescentes com relação à sustentabilidade a longo prazo para vários serviços ecossistêmicos e, em particular, a vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de água (Marques *et al.* 2022). Portanto, o objetivo deste trabalho é calibrar a BRPS considerando os efeitos combinados as futuras mudanças no clima e no uso e cobertura da terra, juntamente com o aumento da demanda para usos humanos e industriais, incluindo as transposições.

METODOLOGIA

Modelagem hidrológica

A Modelagem hidrológica foi realizada em três etapas, a primeira é a calibração do modelo hidrológico; a segunda é a validação e a terceira é a projeção das vazões futuras.

As simulações hidrológicas foram realizadas usando o modelo hidrológico MHD-INPE, modelo baseado em grade regular descrito em Rodriguez e Tomasella (2016). Para a implementação do modelo, a BRPS foi subdividida em 7 sub-bacias, conforme Tabela 1. Os dados de vazão foram fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e as vazões dos reservatórios foram fornecidas pelo Operador do Sistema Elétrico (ONS). A modelagem tem resolução temporal diária e espacial de 5 km².

As mudanças de uso e cobertura da terra (LULC) utilizadas neste trabalho foram fornecidas por Rezende *et al.* (2018) e utilizados na calibração e validação do modelo hidrológico para o período de referencia (1990-2015). As projeções futuras LULC foram extraídas de Paiva *et al.*, (2020).

Os cenários climáticos utilizados neste estudo foram derivados do downscaling dinâmico (resolução espacial de 20 km) do modelo regional Eta forçado por três modelos climáticos globais:



Campos dos Goytacazes/RJ

CanESM2 (Arora *et al.* 2011); HadGEM-ES (MARTIN *et al.* 2007); e MIROC5 (Watanabe *et al.* 2010). Esses cenários foram selecionados porque fornecem uma representação precisa das características climatológicas regionais (Chou *et al.* 2015). Foram considerados dois cenários de emissões de carbono (Representative Concentration Pathways RCP - 4.5 e 8.5) (IPCC 2014), totalizando 6 diferentes projeções. O erro sistemático (viés) dos cenários climáticos foi corrigido usando o método dos quartis proposto por Bárdossy e Pegram (2011) para o período de referência usando dados históricos e aplicado nas projeções futuras. As simulações hidrológicas foram agrupadas em três diferentes fatias de tempo: Período de referência (1990-2015); F1 (2016-2035) e F2 (2036-2055).

Tabela 1- Sub-bacias consideradas.

Sub-bacia	Tipo	Objetivo	Energia Instalada (MW)	Área de Contribuição (km ²)
B01 Estrada do Cunha	Estação	-	-	797.71
B02 Jaguari	Reservatório	Hidroelétrica	27,6	1314.61
B03 São Luiz do Paraitinga	Estação	-	-	1153.91
B04 Paraibuna	Reservatório	Hidroelétrica	85	1848.74
B05 Santa Branca	Reservatório	Hidroelétrica	50	825.66
B06 Funil	Reservatório	Hidroelétrica	222	7290.11
B07 Santa Cecília	Fio-d'água	Transposição	-	3099.18

Calibração

A calibração foi realizada para cada sub-bacia separadamente, iniciando nas as sub-bacias de cabeceira e movendo-se a jusante para as sub-bacias de ordem superior usando o método SCE-UA (Duan *et al.* 1992). Para a calibração das sub-bacias delimitadas por reservatórios (Tabela 1), utilizamos dados medidos de afluência ao reservatório para ajuste do modelo hidrológico. Para calibrar a sub-bacia a jusante, substituímos os dados da vazão de entrada pelos dados do reservatório de saída e adicionamos à vazão da sub-bacia a jusante. Este procedimento foi adotado porque as vazões dos reservatórios variam diariamente de acordo com a demanda hidrelétrica do país.



Campos dos Goytacazes/RJ

O índice de desempenho para calibração e validação foi avaliado utilizando os parâmetros de eficiência de vazão de Nash-Sutcliffe - NASH e para o logaritmo de o fluxo de água - LNASH. Além disso, o desempenho do modelo hidrológico foi avaliado usando o viés dos volumes de vazão – PBIAS.

Validação

Uma vez concluída a calibração, validamos as simulações hidrológicas usando cenários climáticos para o período de referencia (1990-2015) como entrada do modelo hidrológico e comparamos com observações para verificar a capacidade do modelo de simular o regime hidrológico no período de referência (1990-2015). Considerando que as saídas dos modelos climáticos para o período de referência não representam uma sequência histórica de eventos hidrológicos, mas sim suas estatísticas, essas comparações foram realizadas em termos de assinaturas hidrológicas da curva de duração do fluxo.

Simulações futuras

Cada cenário climático foi utilizado como entrada do modelo hidrológico. Em todas as simulações futuras, consideramos o aumento projetado no consumo de água urbana e industrial (AGEVAP 2013) de todos os municípios localizados na bacia e a transposição diária de $5,13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o Sistema Cantareira.

Os resultados foram apresentados a média dos três modelos considerando que o ensemble de modelos geralmente tem um desempenho melhor do que as projeções individuais. Para levar em consideração a produção de energia nos reservatórios, utilizamos o conceito de energia firme. Para calcular a energia firme, estima-se primeiramente a vazão regularizada, que indica a vazão máxima liberada continuamente pelo reservatório durante todo o período histórico (Leão *et al.* 2011) assumindo uma possibilidade de falha de 5%.

Assinaturas hidrológicas

Simulações de descarga avaliadas usando três assinaturas estatísticas das Curvas de Duração de Vazão – FDC (Ley *et al.* 2011): inclinação da FDC para descargas de médio alcance – QSM, que representa a variabilidade média dos coeficientes de escoamento; alto volume do segmento de vazão



Campos dos Goytacazes/RJ

do FDC – MWH, que indica a resposta da bacia a grandes eventos de precipitação; e o volume do segmento de baixa vazão do FDC – MWL, que se refere à sustentabilidade da vazão no longo prazo. Essas assinaturas são calculadas da seguinte forma:

$$QSM = \frac{\text{quantil } 0.8 - \text{quantil } 0.2}{\bar{Q}} \quad (1)$$

$$MWH = \frac{\sum_{h=1}^H Q_H}{H} \quad (2)$$

$$MWL = \frac{\sum_{l=1}^L Q_L}{L} \quad (3)$$

Onde e quantil 0,8 e quantil 0,2 são, respectivamente, as vazões com 80 e 20% de probabilidade de excedência; \bar{Q} é a vazão média para todo o período; Q_H são descargas com probabilidade de excedência inferior a 5%; H o número de valores Q_H ; Q_L as descargas com probabilidade de excedência superior a 95%; L o número de observações Q_L .

As assinaturas hidrológicas foram normalizadas pela área de contribuição da bacia e expressas em mm/dia.

RESULTADOS

Análise de desempenho do modelo hidrológico

O modelo hidrológico apresentou bom desempenho na simulação das séries históricas de vazões observadas para as sub-bacias consideradas (Tabela 2). O índice de desempenho NASH apresentou valores entre 0,63 e 0,92 nas sub-bacias calibradas, enquanto a estatística LNASH apresentou valores variando de 0,62 a 0,89 para as sub-bacias. O valor absoluto do erro volumétrico permaneceu abaixo de 5%. Na Figura 1 temos o hidrograma calibrado da B06 (Funil).

Tabela 2 – Estatísticas de desempenho da calibração do modelo hidrológico MHD-INPE.

Sub-bacias	NASH	LNASH	PBIAS
01	0.65	0.66	-0.02

Campos dos Goytacazes/RJ

02	0.79	0.76	-0.01
03	0.75	0.76	-0.32
04	0.63	0.62	-0.03
05	0.800	0.827	0.11
06	0.85	0.87	-0.21
07	0.92	0.89	0.03

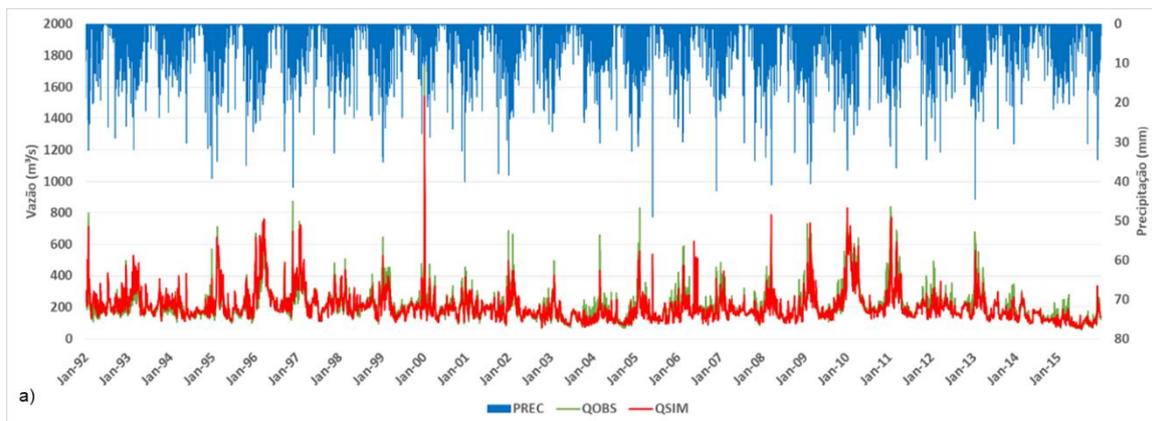


Figura 1 – Hidrograma diário das vazões simuladas versus observadas da sub-bacia B06 (Funil) para o período de 1900-2015. No eixo x temos o tempo simulado. No eixo y temos as vazões observadas – QOBS (linha verde), vazões simuladas – QSIM (linha vermelha) e a precipitação – PREC (colunas azuis).

Impacto das LULC e do clima nas assinaturas de FDC

Observando a validação das vazões simuladas pelo MHD-INPE para o período de referência (Figura 2), temos que o modelo Eta-CanESM2 tende a superestimar os fluxos históricos; o modelo ETA-MIROC5 representou bem as vazões médias, mas superestimou as vazões máximas e mínimas; enquanto o modelo Eta-HadGEM-ES representou melhor as vazões média e mínima, mas subestimou as vazões máximas. De maneira geral, os indicadores apresentaram boa correlação entre as simulações e o modelo climático Eta-HadGEM-ES foi o que melhor representou o regime de vazões da bacia, enquanto os demais superestimaram a variabilidade obtida a partir dos dados observados.

Campos dos Goytacazes/RJ

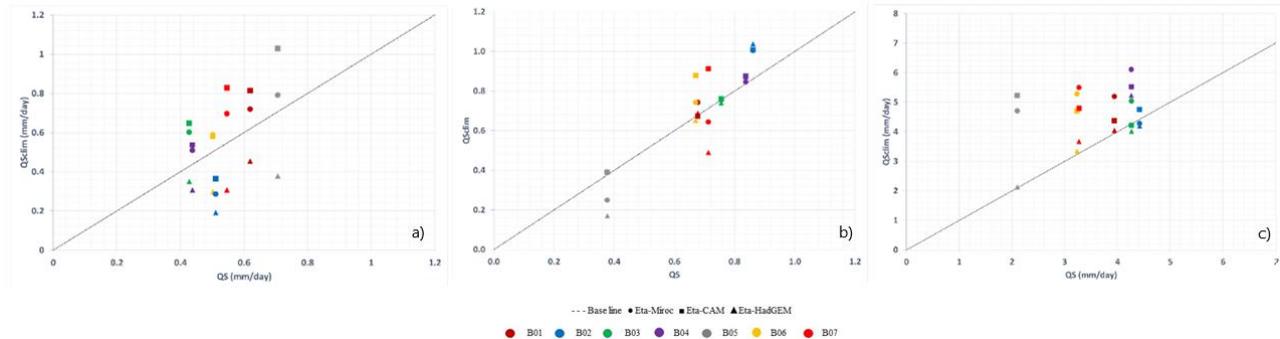


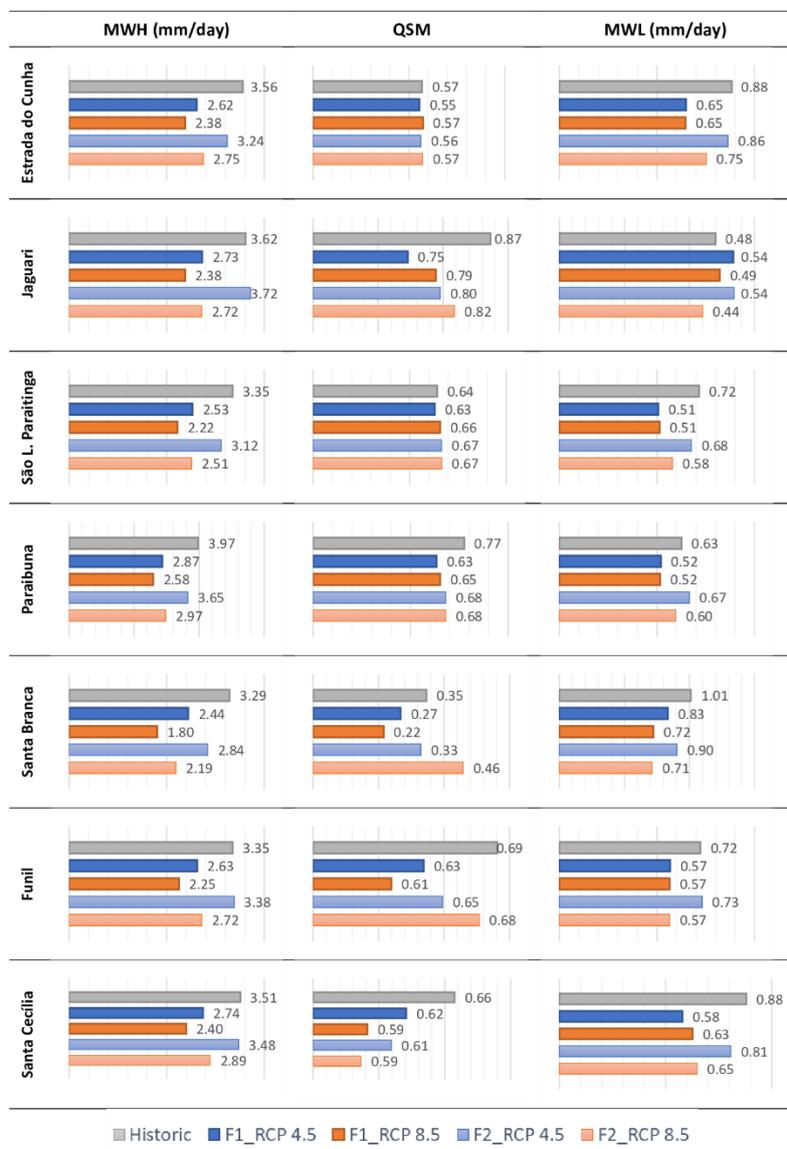
Figura 2 – Comparação entre simulação com dados de modelos climáticos (QSclim) e dados observados (QS) do CPV para todas as sub-bacias estudadas. a) MWH; b) QSM; c) MWL. Cada modelo é representado por um ícone correspondente e cada sub-bacia por uma cor.

Nota-se no índice MWH que a maior parte dos modelos superestimaram as vazões mínimas do período de referência. Essa variação pode ser explicada pela ausência do sinal da seca de 2014 na correção de viés dos cenários climáticos em razão do tempo de recorrência mesma.

A Figura 3 mostra os índices MWH, QSM e MWL, para todas as fatias de tempo, cenários RCP e a média dos cenários climáticos. Quando olhamos para o MWH, observamos que no período F1 RCP4.5 as vazões máximas reduzem cerca de 25% em relação ao período de referência, e voltam a aumentar em F2 RCP 4.5. Nos períodos do RCP 8.5, as vazões máximas reduzem cerca de 30%. A redução do MWH não afasta a possibilidade de cheias excepcionais, porém aponta que as mesmas ocorrerão com menor frequência.

No QSM nota-se uma diferença entre sub-bacias que representam estações hidrológicas (Estrada do Cunha e São Luiz do Paraitinga) e aquelas que representam reservatórios (Jaguari, Paraibuna, Santa Branca, Funil e Santa Cecília). As sub-bacias, Estrada do Cunha e São Luiz do Paraitinga, apresentaram valores de QSM semelhantes aos do período histórico em todos os casos. Os reservatórios apresentaram redução dos valores de QSM em até 23% no cenário F1_RCP 4.5, enquanto que no cenário F2_RCP 4.5 o QSM aumentou e ficou próximo ao histórico. Nos cenários RCP 8.5, em quase todas as sub-bacias o QSM foi menor que os valores correspondentes ao histórico na primeira fatia de tempo F1, e aumentou em F2. Exceto em Santa Cecília, diminuiu 10% em F1 e manteve o índice em F2. Vale ressaltar que a sub-bacia B05 - Santa Branca teve uma redução de 38% no valor de QSM no primeiro período de simulação e um aumento de aproximadamente 70% no segundo, em relação ao primeiro período.

Para o MWL, os fluxos mínimos reduziram cerca de 20% nos cenários do período F1 e depois aumentou para valores semelhantes ao histórico no período F2 em todos os cenários RCP 4.5. Para o RCP 8.5, MWL também diminuiu a uma taxa média de 20% no primeiro período de simulação, porém não aumentou no segundo período. O reservatório Jaguari (B02) apresentou aumento de MWL nos cenários F1_RCP4.5, F2_RCP4.5 e F1_RCP8.5, enquanto apresentou redução de 8% no cenário F2_RCP8.5. A diminuição dos valores de MWL corresponde a estiagens mais severas e com duração mais longa.





Campos dos Goytacazes/RJ

Figura 3 – Comparação entre as assinaturas hidrológicas dos períodos simulados F1(2016-2035) e F2(2036-2055), e o período histórico (1990-2015) para as sub-bacias estudadas. As barras cinzas indicam o período histórico, as barras azuis correspondem ao cenário de emissões RCP 4.5, enquanto as barras laranjas representam o cenário RCP 8.5.

CONCLUSÃO

O processo de calibração do modelo hidrológico MHD-INPE foi bem-sucedido nas bacias estudadas. Somente nas sub-bacias B01 e B04 a calibração foi considerada razoável, levando em conta a limitação do modelo em pequenas bacias e incertezas quanto aos campos de precipitação interpolados em razão da escassez de dados pluviométricos nas bacias de cabeceiras que estão sujeitas a alta variabilidade espacial devido ao efeito topográfico. O modelo teve um bom desempenho nas simulações dos reservatórios considerando as vazões defluentes e afluentes dos mesmos.

As simulações hidrológicas do período de referência foram capazes de reproduzir as principais características da CPV, entretanto, os modelos climáticos Eta_CanESM2 e Eta_MIROC5 tendem a superestimar as vazões, enquanto o Eta-HadGEM-ES subestimou as vazões máximas.

Nas simulações dos períodos futuros os resultados mostraram uma redução nas vazões máximas e mínimas durante o período de (2016-2035) e um aumento para o período de (2036-2055), para os cenários climático de RCP 4.5. Nos cenários climáticos de RCP 8.5 as vazões mínimas tendem a reduzir no primeiro período de simulação e reduzem ainda mais no segundo período de simulação (2036-2055). A redução dos extremos foi associada a um aumento da capacidade de regularização de vazões nos reservatórios da bacia. Todos os cenários prospectados indicaram um aumento na frequência e intensidade dos períodos de estiagens, o que implica um sério desafio para uma bacia com usos comprometidos.

AGRADECIMENTOS - Este trabalho recebeu financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq (Processo 428995/2018-7).

REFERENCIAS

AGÊNCIA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL – AGEVAP(2013). *Avaliação dos impactos de novas transposições de vazão no rio Paraíba do Sul R4: demandas de uso da água consuntivos e não consuntivos*. Resende.

ARORA, V. K.; SCINOCCA, J. F.; BOER, G. J.; CHRISTIAN, J. R.; DENMAN, K. L.; FLATO, G.



Campos dos Goytacazes/RJ

- M.; KHARIN, V. V.; LEE, W. G.; MERRYFIELD, W. J.(2011) *Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases*. Geophysical Research Letters, v. 38, n. 5, p. 3–8.
- BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G.(2011) *Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology*. Water Resources Research, v. 47, n. 4.
- CHOU, S. C.; NOBRE, P. (2015) *Avaliação de modelos globais e regionais climáticos*. In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Base científica das mudanças climáticas. Rio de Janeiro: UFRJ.
- CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S.(2013) *Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil*. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 2, p. 139–152.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.(1992) *Effective and efficient global optimization*. Water Resources Research, v. 28, n. 4, p. 1015–1031.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. (2014)*Contribuição do grupo de trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC)*. [S.l]: IPCC.
- LEÃO, J. C., AMORIM, R.J., FERNANDES, R., GALVÍNCIO, J.D., (2011). *Determinação da Vazão Regularizada de Reservatórios de Grande Porte, na Bacia do Rio Canindé-PI*, in: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceio, pp. 1–11.
- LEY, R.; CASPER, M. C.; HELLEBRAND, H.; MERZ, R.(2011) *Catchment classification by runoff behaviour with self-organizing maps (SOM)*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 15, n. 9, p. 2947–2962.
- MARQUES, A. C.; VERAS, C. E.; RODRIGUEZ, D. A.; (2022) *Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios*. Journal of Hydrology, v608, 127690.
- MARTIN, D.; BÉLANGER, D.; GOSSELIN, P.; BRAZEAU, J.; FURGAL, C.; DÉRY, S. (2007) *Drinking water and potential threats to human health in Nunavik: adaptation strategies under climate change conditions*. Arctic, v.60, n.2, p.192-202.
- NOBRE, C. A.; MARENGO, J.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, L.A.; ALVES, L. M. (2016). *“Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015”*. J Water Resour Prot 08, 252–262.
- PAIVA, A. C. E.; NASCIMENTO, N.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; CARRIELLO, F.; REZENDE, F. S. (2020). *Urban Expansion and Its Impact on Water Security: The Case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil*, Science of the Total Environment, 720, pp. 1–12.
- REZENDE, F. S.; CARRIELLO, F.; RODRIGUEZ, D. A.; NEVES, O. M. S. (2018). *Spatial and Temporal Changes in the Land Use and Cover of the Paraíba Valley in São Paulo, Brazil: Development of Future Scenarios*. Revista Brasileira de Geografia Física, 11(5), pp. 1732–1747.
- RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.(2016)_ *On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins*. Hydrological Sciences Journal, v. 61, n. 10, p. 1–16.
- WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O’ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZAKI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M.(2010) *Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity*. Journal of Climate, v. 23, n. 23, p. 6312–6335.