

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## PROJEÇÕES DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE AS BACIAS DO HIDROSSISTEMA JAGUARIBE, CEARÁ, BRASIL, UTILIZANDO INFORMAÇÕES DO CORDEX DO MODELO CLIMÁTICO REGIONAL RCA4

Greicy Kelly da Silva <sup>1</sup>  
Cleiton da Silva Silveira <sup>1</sup>  
Marx Vinicius Maciel da Silva <sup>1</sup>  
Antônio Duarte Marcos Júnior <sup>1</sup>  
Carlos Eduardo Sousa Lima <sup>1</sup>

## PROJECTIONS OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE JAGUARIBE HIDROSYSTEM BASINS, CEARÁ, BRAZIL, USING INFORMATION FROM THE CORDEX REGIONAL CLIMATE MODEL RCA4

Recibido el 1 de diciembre de 2020. Aceptado el 5 de mayo de 2021

### Abstract

The objective of this work was to analyze the projections of precipitation, temperature and streamflow fields over the Banabuiú, Castanhão and Orós Hydrographic Basins (HBs) from five models (CSIRO-Mk3-6-0, ICHEC-EC-EARTH, IPSL-CMSA-MR, HadGEM2-ES and NOAA-GFDL-ESM2M) participating in the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment. The methodology consisted in evaluating the representation of the present climate through seasonality and inter-annual variability and in analyzing the medians of anomalies and trends of variables. In general, the models showed good representation of the climatological average observed over the basins, especially in the driest months: August to October. Castanhão HB showed greater inter-annual variability in its observed rainfall pattern. In the analysis simulations of the future climate of precipitation and streamflow, the results indicated a distribution of projections in different directions among the analyzed periods, with a pattern of anomaly reductions for the first period (2006-2035) and of increase for the last 30-year cycle of the century (2066-2095) in the two scenarios and in all the basins. In the second period (2035-2065) and between the scenarios, a greater dispersion between the modules and the directions of the medians were observed. The annual temperature averages showed an increase throughout for 21st century for the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, with higher intensity in the latter. In the trend analysis, the CSIRO-Mk3-6-0 model projected the greatest impacts of increasing temperature and reducing streamflow and precipitation, while the IPSL-CMSA-MR model indicated the greatest positive trends of rain and streamflow.

**Keywords:** climates changes, CSIRO-Mk3-6-0, Jaguaribe System.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará, Brasil.

\* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Bloco 713, 1º Andar, Campus do Pici, CEP: 60455.760, Fortaleza/Ceará, Brasil. Email: [greicykellysilvagks@gmail.com](mailto:greicykellysilvagks@gmail.com)

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi analisar as projeções dos campos de precipitação, temperatura e vazão sobre as Bacias Hidrográficas (BHs) Banabuiú, Castanhão e Orós a partir de cinco modelos (CSIRO-Mk3-6-0, ICHEC-EC-EARTH, IPSL-CMSA-MR, HadGEM2-ES e NOAA-GFDL-ESM2M) participantes do Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment. A metodologia consistiu na avaliação da representação do clima presente através da sazonalidade e variabilidade interanual e na análise das medianas de anomalias e tendências das variáveis. Em geral, os modelos mostraram boa representação da média climatológica observada sobre as bacias, sobretudo nos meses mais secos: agosto a outubro. A BH Castanhão apresentou maior variabilidade interanual em seu padrão observado de chuva. Na análise das simulações do clima futuro de precipitação e vazão, os resultados apontaram uma distribuição das projeções em direções diferentes dentre os períodos analisados, com um padrão de redução das anomalias para o primeiro período (2006-2035) e de aumento para o último ciclo de 30 anos do século (2066-2095) nos dois cenários analisados e em todas as bacias. Se observou no segundo período (2035-2065) e entre os cenários, uma maior dispersão entre os módulos e as direções das medianas. As médias anuais de temperatura mostraram aumento durante o século XXI para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, com maior intensidade neste último. Na análise das tendências, o modelo CSIRO-Mk3-6-0 projetou os maiores impactos de aumento da temperatura e de redução da vazão e precipitação, ao passo que o modelo IPSL-CMSA-MR indicou as maiores tendências positivas de chuva e vazão.

**Palavras chave:** mudanças climáticas, CSIRO-Mk3-6-0, Sistema Jaguaribe.

## Introdução

As mudanças climáticas vêm proporcionando modificações do padrão médio de ocorrência dos processos hidrológicos e seus modos de variação, o que acarreta na desestabilização das sociedades e ecossistemas, interferindo diretamente no meio ambiente, agricultura, qualidade do ar, economia, setor energético e entre outras diversas esferas. Alterações nas forçantes radioativas causadas por fatores naturais ou antropogênicos são apontadas pela comunidade científica como as responsáveis pelas mudanças do clima. As emissões significativas, a partir de atividades antrópicas, de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de outros gases, que contribuem para a formação do efeito estufa, vem sendo apontada como a principal agente causadora dessas alterações desde meados do século XX (IPCC, 2013; PBMC, 2016; Costa, 2017; Silva *et al.* 2020).

De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), ocorrerão mudanças até o final do século XXI considerando diferentes cenários de emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), que caso se mantenham com a taxa de crescimento atual, estima-se um aumento de 2.6 a 4.8 °C na temperatura média global. Vale ressaltar que um aquecimento linear médio de 0.85 °C, combinando as superfícies terrestre e oceânica, já foi observado no período de 1880 a 2012 no globo (IPCC, 2013). Em escala planetária, as principais consequências das mudanças climáticas no tocante aos recursos hídricos são: aumento de temperatura; mudanças nos padrões de precipitação e cobertura de neve; alterações na disponibilidade de água e um provável aumento na frequência e severidade de eventos extremos (Guimarães *et al.*, 2016; Costa, 2017; Marengo *et al.*, 2018). O IPCC (2013), a Agência Nacional de Águas (2016), o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016) e

Lyra *et al.* (2016) apontam que o Brasil é uma das regiões no globo mais suscetíveis as mudanças climáticas. A recarga de água subterrânea também pode ser afetada com uma redução na disponibilidade de água subterrânea para água potável em algumas regiões. De acordo com o estudo de Doll (2009), no Nordeste do Brasil (NEB) estima-se uma redução na recarga em 70% até 2050. Nessa região situa-se uma extensa área do semiárido brasileiro, sendo a reserva de água um elemento crucial para garantir a sobrevivência nessa região.

Nesse sentido, vêm sendo de extrema importância estudos direcionados para a identificação e avaliação dos impactos causados pelas alterações e variabilidade do clima no globo, uma vez que atuam como subsídios na elaboração de planos mitigadores, de modo a gerenciar os possíveis riscos climáticos (Silveira *et al.*, 2018, Silva *et al.*, 2020). De acordo com Sales *et al.* (2015) técnicas de regionalização da escala de dados oriundos de Modelos Climáticos Globais (MCGs), tais como o downscaling dinâmico, por exemplo, tem colaborado com os vários estudos que até então têm requerido informações em escala regionalizada. Utilizando esta técnica, destaca-se o Projeto Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) que fornece dados de projeções globais provenientes de modelos participantes do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) sobre alguns domínios do globo (Giorgi *et al.*, 2009; Guimarães *et al.*, 2016).

De uso dos dados do Projeto CORDEX, Guimarães *et al.* (2016), Sales *et al.* (2015), Reboita *et al.* (2014) e Da Rocha *et al.* (2014), analisaram o clima atual e cenários climáticos futuros valendo-se de diferentes Modelos Climáticos Regionais (MCRs) nas regiões do Nordeste do Brasil (NEB), Norte e Sul do NEB, no continente da América do Sul (AS) e AS, respectivamente. Mais recentemente, Da Silva *et al.* (2020) avaliaram os possíveis impactos no regime dos campos de precipitação e temperatura para o século XXI nas regiões hidrográficas brasileiras utilizando nove modelos participantes do Projeto supracitado. Através da análise das anomalias e tendências, foi projetado o aumento da temperatura em todas as regiões e em todos os cenários. A mediana das anomalias de precipitação indicou aumentos entre 10% e 30% no Atlântico Leste, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Paraguai, Parnaíba, Tocantins-Araguaia e São Francisco. Anomalias negativas foram identificadas no Sudeste e principalmente no Sul do Brasil, apontando reduções na precipitação. De outra forma, Silva *et al.* (2020) avaliaram, segundo o método proposto por Silveira *et al.* (2019), o desempenho das simulações do Projeto CORDEX quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre o município de Fortaleza, no Estado do Ceará. O modelo regional ETA aninhado com o MCG CanESM2 apresentou o melhor desempenho na representatividade do clima presente.

Desse modo, os diversos estudos de processos hidrológicos em bacias hidrográficas corroboram com os órgãos do governo e sociedade no que tange à tomada de decisões, no que se refere ao processo de gerenciamento dos reservatórios, bem como na mitigação dos riscos associados às mudanças do clima. Ressalta-se a alta vulnerabilidade de regiões que possuem grande

variabilidade pluviométrica natural e que ao longo dos últimos anos, vem sofrendo com períodos prolongados de estiagem – como é o caso do NEB, onde localiza-se o Estado do Ceará. Aqui, a Bacia do Rio Jaguaribe compõe um dos principais sistemas hídricos do Estado. Considerando o aumento das emissões dos gases de efeito estufa, este trabalho tem como objetivo analisar as projeções resultantes dos campos de precipitação, temperatura e vazão de alguns modelos participantes do Projeto CORDEX, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o século XXI em três Bacias Hidrográficas (BHs) pertencentes ao sistema hídrico da Bacia do Rio Jaguaribe: Banabuiú, Castanhão e Orós.

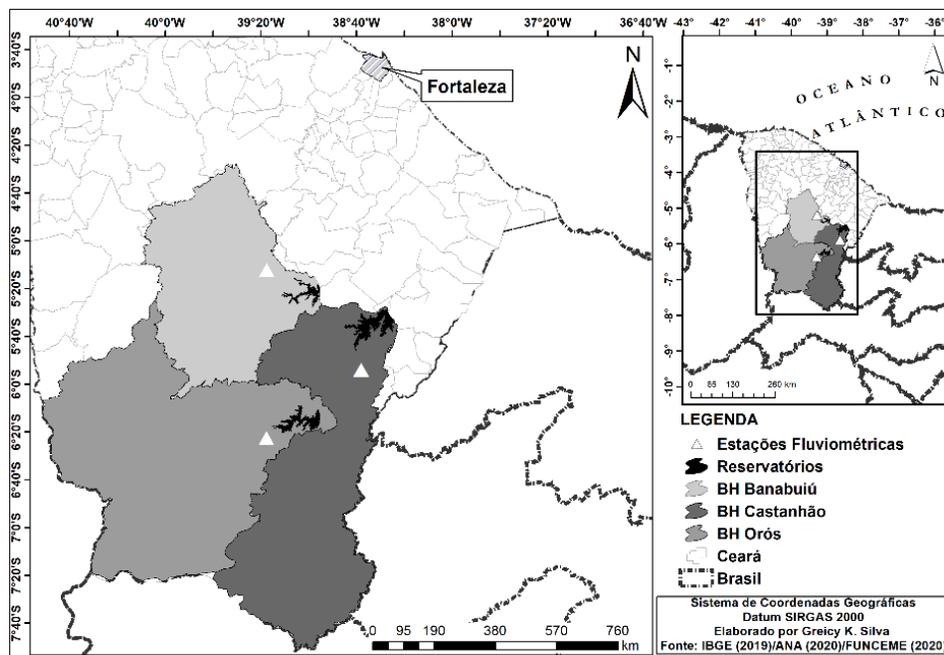
## Metodologia

### Região de estudo

As Bacias Hidrográficas dos Açudes Banabuiú, Castanhão e Orós (doravante denominadas BH Banabuiú, BH Castanhão e BH Orós, respectivamente) fazem parte de sub-bacias da Bacia do Rio Jaguaribe: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe e Banabuiú; somando juntas uma capacidade de acumulação de 10 241 hm<sup>3</sup> (Silva *et al.*, 2019) (ver Figura 1).

Os açudes supracitados constituem também o principal sistema de reservatórios do Estado do Ceará: o sistema Jaguaribe-Metropolitano; responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Contribuindo através do Canal do Trabalhador, as sub-bacias do rio Jaguaribe se integram com a RMF, por meio de um importante sistema de transferência hídrica do Ceará: o Eixão das Águas; que atende às demandas dos usuários agrícolas e implementa o sistema próprio de abastecimento da RMF composto por cinco reservatórios: Gavião; Pacoti e Riachão, Pacajus e Aracoíaba – atendendo às demandas do abastecimento humano e indústrias (Ceará, 2016; Silva *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2019).

A BH Banabuiú drena uma área de 13 500 km<sup>2</sup>. O maior nível de açudagem lhe é conferido por englobar 17 açudes monitorados. O açude Banabuiú é a terceira reserva hídrica mais importante da Bacia do Rio Jaguaribe, acumulando o total de 2 755 909 000 m<sup>3</sup> (Ceará, 2018). O Açude Castanhão e sua bacia hidrográfica estão localizados no semiárido do sudoeste do Estado do Ceará. Com área de 20 069 km<sup>2</sup> compõe a Sub-Bacia do Médio Jaguaribe (Ceará, 2019). A BH Orós, por sua vez, drena uma área de 24 639 km<sup>2</sup>, correspondente a 16.56% do território cearense. Localizando-se a montante do açude Orós, a bacia possui a capacidade de acumular 2 792 563 000 m<sup>3</sup> de águas superficiais. Detém o maior reservatório em acumulação: o próprio Açude Orós, comportando até 1 940 000 000 de m<sup>3</sup> (Ceará, 2018). Todas as BHs supracitadas possuem clima do tipo Tropical Quente Semiárido, com temperaturas médias anuais em torno dos 27 °C para as BHs Banabuiú e Castanhão e 28 °C para a BH Orós. Nesta, as precipitações médias anuais encontram-se entre 500 mm e 700 mm, naquelas a média pluviométrica anual é de 725.4 mm e 742.6 mm, respectivamente (Ceará, 2016).



**Figura 1.** Localização das Bacias Hidrográficas dos Açudes Banabuiú, Castanhão e Orós.

### Dados utilizados

Este estudo utilizou séries mensais dos campos de precipitação, temperatura do ar próximo à superfície, temperatura máxima do ar próximo à superfície e temperatura mínima do ar próximo à superfície obtidos de cinco modelos climáticos globais (descritos na tabela 1) que foram utilizados como condição de contorno na regionalização de escala, através do processo de downscaling dinâmico para o modelo regional sueco Rossby Centre regional atmospheric model (RCA4) pelo CORDEX, gerando simulações mais refinadas e com resolução espacial de  $0.44^\circ \times 0.44^\circ$ .

**Tabela 1.** Modelos globais do Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) utilizados e suas respectivas instituições/agências e países de origem.

Modelo	Instituição ou Agência	País
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization em colaboração com o Queensland Climate Change Centre of Excellence	Austrália
ICHEC-EC-EARTH	Irish Centre for High-End Computing	Irlanda
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace	Paris
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	Reino Unido
NOAA-GFDL-ESM2M	National Oceanic and Atmospheric Administration e Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos

As simulações tiveram como domínio a área da América do Sul (denominada SAM-44i) – de localização 18.75 N-58.25 S e 16.25 W-106.25 W. As médias espaciais foram calculadas em cada ponto de grade, sendo esta obtida por meio da interpolação bilinear da grade original de SAM-44 sobre cada bacia.

As séries mensais utilizadas abrangeram o período de 1951 a 2005 (período de referência) e de 2006 a 2100 (período para as projeções). As projeções utilizadas neste estudo se baseiam em cenários denominados Representative Concentration Pathways (RCP), publicados pelo IPCC no Quinto Relatório de Avaliação (AR5 - Fifth Assessment Report) e que representam os conjuntos de projeções das componentes de forçantes radiativas de cunho antropogênico, utilizados como dados de entrada nos MCGs para modelagem climática e química da atmosfera (IPCC, 2013).

De acordo com o AR5, os cenários possíveis para o final do século XXI são: RCP 3.0-PD (Peak and Decline), com pico na forçante radiativa em 3 W/m<sup>2</sup> em meados do século XXI que decai para 2.6 W/m<sup>2</sup> até 2100, sendo denominado também de RCP 2.6; RCP 4.5 com estabilização em 4.5 W/m<sup>2</sup> antes do final do século XXI; RCP 6.0 com estabilização em 6 W/m<sup>2</sup> após 2100; e RCP 8.5 com caminho crescente, atingindo 8.5 W/m<sup>2</sup> em 2100 e 12 W/m<sup>2</sup> após o século XXI (IPCC, 2013). Dessa forma, este trabalho utilizou o cenário intermediário RCP 4.5 e o cenário de emissões muito altas de GEEs, o RCP 8.5. Utilizou-se também a climatologia de precipitação proveniente do Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) no período de 1891 a 2016, em uma grade regular de 0.5° × 0.5°, oriunda do sítio de dados <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html> (New *et al.*, 1999). Além disso, foram utilizadas as séries mensais entre os anos de 1901 a 2019 das variáveis de temperatura média ( $t_{as}$ ), temperatura mínima ( $t_{as_{min}}$ ) e temperatura máxima ( $t_{as_{max}}$ ) próximas a superfície, obtidas do Climatic Research Unit - CRU da University of East Anglia, localizada em Norwich no Reino Unido, para o cálculo da série observada de ETP. Os dados de vazão foram obtidos a partir do sítio de dados da ANA e são provenientes de postos fluviométricos com localizações mostradas na Figura 1. Os códigos das estações utilizadas para as BHs Banabuiú, Castanhão e Orós são 36470000, 36320000 e 36160000, respectivamente.

### Evapotranspiração Potencial

A Evapotranspiração Potencial (ETP) foi estimada através do Método de Hargreaves-Samani (Hargreaves e Samani, 1985; Hargreaves, 1994). A ETP é computada através da equação 1:

$$ETP = 0.0023(t_{as_{max}} - t_{as_{min}})^{0.5} (t_{as} + 17.8)R_a \quad \text{Equação (1)}$$

em que a ETP é dada em mm/mês,  $t_{as}$ ,  $t_{as_{min}}$  e  $t_{as_{max}}$  em ° C e a Radiação Externa Média ( $R_a$ ) foi estimada a partir da latitude e do mês do ano. Mais informações são encontradas no trabalho de Hargreaves (1994).

### Correção estatística

As séries temporais de precipitação e ETP sofreram uma remoção de viés via Cumulative Distribution Function (CDF) Gama com o mapeamento da probabilidade de modo a corrigir estatisticamente as saídas dos modelos climáticos produzindo campos internamente consistentes que tenham a mesma distribuição de intensidade estatística das observações (Silva *et al.*, 2020). Para a distribuição de probabilidade de precipitação, vem-se tomando a distribuição Gama (Thom, 1958), com os parâmetros de forma e escala  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente. Estudos como de Block *et al.* (2009), Piani *et al.* (2010), Teutschbein e Seibert (2012) e Lafon *et al.* (2013) mostraram que esse método se apresenta eficaz na mitigação dos erros sistemáticos de MCRs. A Equação 2 expressa a distribuição Gama (Thom, 1958):

$$f_{\gamma}(x|\alpha,\beta)=\frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}e^{-x/\beta};x\geq 0;\beta>0$$

**Equação (2)**

Onde

x: Variável aleatória (nesse caso precipitação e ETP) e, portanto,  $x > 0$ ;

$\Gamma$ : Função Gama.

Os parâmetros de forma e escala são estimados para cada ponto de grade e para cada mês, sendo sua metodologia equacionada a seguir. As Equações 3, 4, 5, 6 e 7 expressam matematicamente o processo de correção de viés dos dados de precipitação e ETP:

$$(\alpha_s, \beta_s) = \text{gamafit}(x_s)$$

**Equação (3)**

$$H_{SR} = F_{\gamma}(x_s, \alpha_s, \beta_s)$$

**Equação (4)**

Onde

$\alpha_s$  e  $\beta_s$ : Parâmetros de forma e escala, respectivamente, referentes aos dados históricos que foram simulados pelos modelos;

$F_{\gamma}$ : CDF Gama.

Tomando-se os dados históricos observados, tem-se:

$$(\alpha_o, \beta_o) = \text{gamafit}(x_o)$$

**Equação (5)**

$$H_{OR} = F_{\gamma}(x_o, \alpha_o, \beta_o)$$

**Equação (6)**

$$H_{CR} = F_{\gamma}^{-1}(H_{SR}, \alpha_o, \beta_o)$$

**Equação (7)**

Onde

$\alpha_o$  e  $\beta_o$ : Parâmetros de forma e escala, respectivamente;

$F_{\gamma}^{-1}$ : Inverso da CDF Gama;

$H_{CR}$ : Variável corrigida de tendência histórica.

Feito isso, as Equações 8, 9 e 10 são usadas para a correção dos vieses dos dados dos cenários futuros simulados pelos modelos do Projeto CORDEX:

$$(\alpha_f, \beta_f) = \text{gamafit}(x_f)$$

$$F_{SR} = F_Y(x_f, \alpha_f, \beta_f)$$

$$F_{CR} = F_Y^{-1}(F_{SR}, \alpha_f \frac{\alpha_s}{\alpha_o}, \beta_f \frac{\beta_s}{\beta_o})$$

**Equação (8)**

**Equação (9)**

**Equação (10)**

Onde

$\alpha_f$  e  $\beta_f$ : Parâmetros de forma e escala, respectivamente, referentes aos dados de precipitação e ETP futuros que foram simulados pelos modelos;

$x_f$ : Variável futura simulada;

$F_{CR}$ : Variável corrigida de tendência futura.

Para mais informações sobre o método de correção estatística através do CDF gama, consultar Modala (2014).

### Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure)

O SMAP é um modelo hidrológico determinístico, conceitual e concentrado do tipo transformação chuva-vazão, proposto por Lopes *et al.* (1981). Originalmente de estrutura diária, sofreu modificações oferecendo posteriormente as versões horária e mensal. Tomando os parâmetros capacidade de saturação do solo ( $S_{tr}$ ) em mm, parâmetro de escoamento superficial ( $P_{es}$ ) adimensional, coeficiente de recarga ( $C_{rec}$ ) também adimensional e a constante de recessão ( $K_k$ ) em mês  $-1$ , o SMAP mensal considera dois reservatórios hipotéticos – solo ( $R_{solo}$ ) e subterrâneo ( $R_{sub}$ ), atualizando suas variáveis de estado a cada instante de tempo, de acordo com as equações 11 e 12 e com a inicialização dos reservatórios matematicamente expressa pelas Equações 13 e 14:

$$R_{solo}(i+1) = R_{solo}(i) + P - E_s - E_r - R_{ec}$$

**Equação (11)**

$$R_{sub}(i+1) = R_{sub}(i) + R_{ec} - E_b$$

**Equação (12)**

$$R_{solo}(1) = Tu_{in} \cdot S_{tr}$$

**Equação (13)**

$$R_{sub}(1) = \frac{Eb_{in}}{(1-K_k)/a_d \cdot 2630}$$

**Equação (14)**

Onde

P: Chuva (mm);

$E_s$ : Escoamento superficial (mm);

$E_r$ : Evapotranspiração real (mm);

$E_b$ : Escoamento básico (mm);

$Tu_{in}$ : Teor de umidade inicial (adimensional);

$Eb_{in}$ : Vazão básica inicial ( $m^3/s$ );

$a_d$ : Área de drenagem em  $km^2$ .

No ato da iniciação da simulação, o modelo obedece ao pressuposto de que há água armazenada nos referidos reservatórios. Para isso, os parâmetros supracitados recebem uma atribuição de valores. Dessa forma, a cada atualização de instante de tempo, incorpora-se um dado médio novo de precipitação, por meio das chamadas equações de transferências (Equações 15,16,17,18):

$$E_s = f_1 \cdot P$$

**Equação (15)**

$$E_r = f_2 \cdot E_p$$

$$R_{ec} = f_3 \cdot R_{solo}$$

$$E_b = f_4 \cdot R_{sub}$$

**Equação (16)**

**Equação (17)**

**Equação (18)**

Onde

$E_p$ : Evapotranspiração potencial;

$$f_1 = T_u^{P_{es}};$$

$$f_2 = T_u;$$

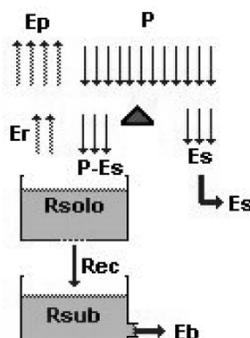
$$f_3 = C_{rec} \cdot T_u^4;$$

$$f_4 = 1 - K_k.$$

A cada instante de tempo é realizado um balanço de massa na área de drenagem considerada. Ocorre a transferência de uma parcela de  $P$  como  $E_s$ . A lâmina restante de  $P$  é subtraída do  $E_s$  e da  $E_p$ , sendo descarregada em seguida ao  $R_{solo}$ . Aqui, as perdas por  $E_r$ , que, por sua vez, dependem do nível do reservatório e da  $S_{tr}$ , confere uma atualização da umidade do solo ao longo do tempo. Com base no  $T_u$ , no  $R_{solo}$  e no  $C_{rec}$  é estimada a  $R_{ec}$ , outra variável de saída que é descarregada no  $R_{sub}$ . Neste, o nível de água sofre redução a uma taxa constante de acordo com  $K_k$ , gerando como saída o  $E_b$ . A vazão total no ponto de controle da bacia é dada pela soma de  $E_s$  com  $E_b$ , conforme a Equação 19. A Figura 2 ilustra como funciona o modelo SMAP mensal.

$$Q = \frac{(E_s + E_b) \cdot A_d}{2630}$$

**Equação (19)**



**Figura 2.** Esquemática do funcionamento do modelo SMAP mensal. Adaptado de Lopes (1999).

Para calibrar o modelo SMAP mensal, os parâmetros  $S_{tr}$ ,  $P_{es}$  e  $C_{rec}$  sofreram uma otimização através da função Solver do software Microsoft Office Excel. As variáveis precipitação (mm/mês), vazão (m<sup>3</sup>/s), evapotranspiração potencial (mm/mês) e área da bacia (km<sup>2</sup>) foram inseridas como dados de entrada. A função objetivo utilizada para calibração foi o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) – equação 20 conforme Mathias *et al.* (2015) – que tem se mostrado um importante critério estatístico e muito usado para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos (Machado e Vettorazzi, 2003; Andrade *et al.*, 2017).

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^N(o_i-m_i)^2}{\sum_{i=1}^N(o_i-\bar{o}_i)^2}$$

**Equação (20)**

Onde

N: Número de amostras;

 $o_i$ : Dados observados; $m_i$ : Dados modelados; $\bar{o}_i$ : Média dos dados observados.

O NSE varia entre negativo infinito a 1, sendo este valor a indicação de um perfeito ajuste (Asce, 1993). O desempenho do modelo pode ser classificado conforme os critérios abordados por Silva *et al.* (2008): para NSE maior que 0.75 tem-se desempenho bom; NSE entre 0.36 e 0.75, confere um desempenho aceitável e para NSE inferior a 0.36 seu desempenho é considerado inaceitável. Verificou-se ainda o coeficiente de correlação de Pearson (R). Em sua expressão, este coeficiente fornece o grau de correlação (associação) linear entre duas variáveis quantitativas (Moore, 2007). Seguindo a formulação adotada por Jolliffe e Stephenson (2003), a Equação 21 define R como:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\phi'_i \psi'_i}{\sigma_\phi \sigma_\psi} \right)$$

**Equação (21)**

Onde

 $\phi'_i$ : Desvio da série estimada; $\psi'_i$ : Desvio da série observada; $\sigma_\phi$  e  $\sigma_\psi$ : Desvios padrões das médias das séries estimada e observada, respectivamente.

Basicamente, sua interpretação consiste no fato de que quanto mais próximo de 1 seja o valor de r, maior é a força associativa entre as variáveis ao mesmo tempo que o sinal funciona como um indicador da direção positiva/negativa desta relação. Dessa forma, os valores de r para -1 e 1 remetem a uma correlação perfeita, enquanto que o valor de zero para r, remete a nenhuma relação linear entre as variáveis estudadas (Moore, 2007).

Também foram atribuídos valores para as variáveis que descrevem as condições iniciais das bacias:  $Tu_{in}$  e  $Eb_{in}$ , reajustadas manualmente a cada rodada de simulação até alcançar o melhor valor de performance do NSE.

Para a calibração e validação dos modelos do Projeto CORDEX, foram considerados períodos concomitantes de dados de vazão, ETP e precipitação. Para calibração foram selecionados os períodos de 1996-2005, 2000-2005 e 1974-2001 e para a validação os períodos de 2006-2016, 2006 a 2011 e 1992 a 2010 para as BHs Banabuiú, Castanhão e Orós, respectivamente. As Tabelas 2 e 3 mostram para cada bacia os parâmetros calibrados do modelo SMAP mensal e os valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e R obtidos para as séries calibradas e validadas.

**Tabela 2.** Parâmetros calibrados do modelo SMAP mensal.

Bacia Hidrográfica	Tu <sub>in</sub>	Eb <sub>in</sub>	S <sub>tr</sub>	P <sub>es</sub>	C <sub>rec</sub>	K <sub>k</sub>
Banabuiú	32	0	3644.67	3.98	0	4.5
Castanhão	30	0	484.64	10	2.92	6
Orós	30	0	1302.45	4.10	0	2

**Tabela 3.** Valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e coeficiente de correlação de Pearson para as séries calibradas e validadas.

Bacia Hidrográfica	NSE		R	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
Banabuiú	0.58	0.37	0.74	0.63
Castanhão	0.62	0.54	0.79	0.87
Orós	0.86	0.56	0.93	0.77

### Análise das projeções

As projeções de precipitação, ETP, vazão e temperatura dos modelos globais do projeto CORDEX foram analisadas nas bacias hidrográficas para o período de 2006 a 2095, considerando três ciclos de 30 anos: 2006-2035; 2036-2065 e 2066 a 2095.

Para o cálculo das anomalias médias anuais ( $A_{\text{anual}}$ ) das variáveis de precipitação, ETP e vazão, utilizou-se a Equação 22:

$$A_{\text{anual}} = \frac{(z_{\text{XXI}}^a - z_{\text{XX}}^a)}{z_{\text{XX}}^a} \cdot 100 \quad \text{Equação (22)}$$

Onde

$z_{\text{XXI}}^a$ : Média da variável anual para o cenário do século XXI;

$z_{\text{XX}}^a$ : Média da variável anual para o cenário histórico.

Para o cálculo da anomalia da temperatura considerou-se a diferença entre as médias da temperatura dos períodos no século XXI e no século XX.

Dentre as estatísticas descritivas utilizadas neste estudo, tem-se a média ( $\bar{x}$ ) que descreve a amostra de N valores  $x_i$  que compõe a série, como um único valor que representa o centro da distribuição dos dados e a mediana, que, por sua vez, atua como uma medida de posição e representa o valor que é superado em 50 % dos pontos da amostra – para mais informações e equacionamento ver Collischonn e Dornelles (2013).

A análise da tendência foi feita através do teste não-paramétrico Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1975) e declividade de Sen (1968). Moreira e Naghettini (2016) destacam que

esse teste vem sendo bastante utilizado para a detecção de tendências monotônicas em séries de observações hidrológicas, apresentando resultados coerentes por diversos autores ao testar a hipótese nula ( $H_0$ ) de ausência de tendência como acrescenta Portela (2011).

Considerando uma série  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  obtida de uma amostra de  $n$  variáveis aleatórias independentes e igualmente distribuídas, calcula-se a estatística de MK através da Equação 23 (Paulino *et al.*, 2019):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sign}(x_j - x_i) \quad \text{Equação (23)}$$

Onde

$x_i$  e  $x_j$ : Valores sequenciais;

$i$  e  $j$ : Índices de tempo;

$n$ : Número de elementos da série.

O termo  $\text{Sign}(x_j - x_i)$  é resultado da Equação 3:

$$\text{Sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad \text{Equação (24)}$$

A hipótese nula  $H_0$  foi testada sobre a estatística  $S$  através das variáveis de correlação de Tau de Kendall ( $\tau$ ) e p-valor. Através da probabilidade acumulada da distribuição normal, pode-se estimar o p-valor para os dados da amostra. Tomando-se  $\alpha = 0.05$  como o nível de significância comumente utilizado na literatura para o teste MK, se  $p \leq \alpha$ , rejeita-se  $H_0$ , o que indica a existência de tendência na série analisada (Moreira e Naghettini, 2016). A variável  $\tau$  quantifica a magnitude da relação monotônica e é computada através da Equação 25 (Bari *et al.*, 2016):

$$\tau = \frac{S}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad \text{Equação (25)}$$

Valores positivos de  $S$  indicam tendência crescente, enquanto valores negativos apontam tendência decrescente. Consultar mais detalhes da estatística de teste MK em Paulino *et al.* (2019).

De forma a complementar o teste MK, obtendo as magnitudes das tendências detectadas, utilizou-se o teste de declividade de Sen (doravante denominado Sen). Estimado matematicamente pela estatística  $Q$  equacionada a seguir (Tao *et al.*, 2014):

$$Q_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i}; \quad i < j \quad \text{Equação (26)}$$

Onde

$x_i$  e  $x_j$ : Valores da variável nos instantes de tempo  $i$  e  $j$ .

O valor positivo ou negativo para Q indica tendência crescente ou decrescente, respectivamente. A declividade de Sen é dada pela mediana dos N valores de Qij. No caso de haver apenas uma referência em cada período de tempo e sendo n o tamanho da série, tem-se N pares de dados como:

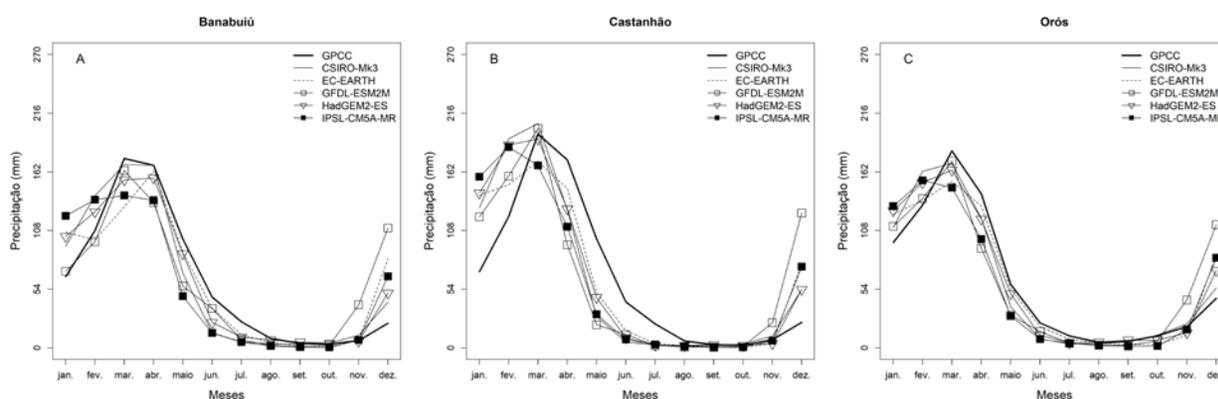
$$N = n \frac{n-1}{2}$$

Equação (27)

## Resultados

### Avaliação dos modelos

Nas Figuras 3A, 3B e 3C são mostradas as climatologias de precipitação para as BHs Banabuiú, Castanhão e Orós, respectivamente, para o período de 1891-2016 (GPCC) e 1951-2005 (CORDEX).

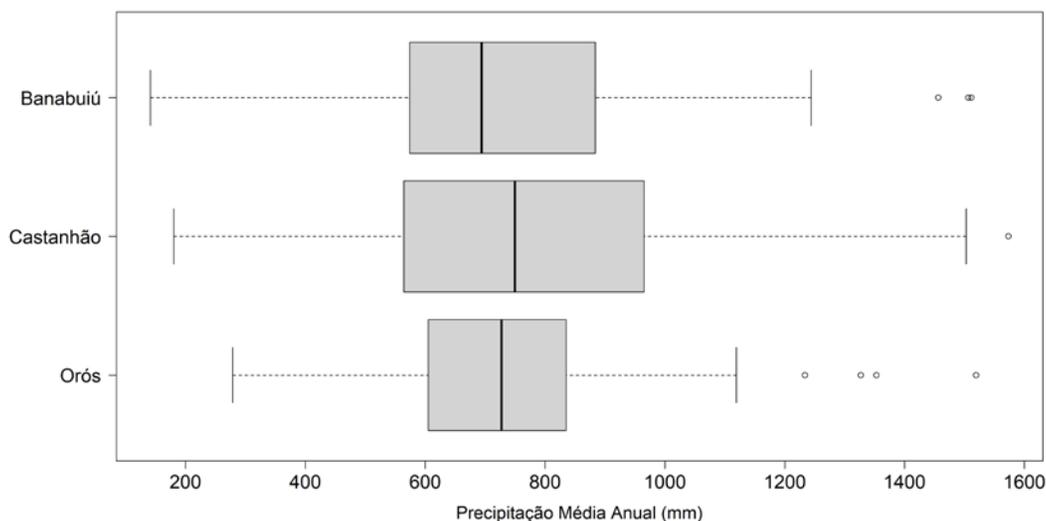


**Figura 3.** Série climatológica de precipitação para o período de 1891-2016 (GPCC) e 1951-2005 (CORDEX) para as BHs A) Banabuiú; B) Castanhão e C) Orós.

As Figuras acima mostram que na maioria das bacias e preferencialmente nos meses de agosto a outubro, convergiu-se razoavelmente a partir dos modelos do projeto CORDEX quanto à quantidade de precipitação observada. O segundo semestre, que no geral abrange o período seco do Estado, apontou uma baixa variabilidade, principalmente nos meses de agosto a outubro. Fato que explica esta característica pode estar associado com o período de afastamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é o principal sistema meteorológico responsável pelo regime de chuvas sobre o norte do NEB/CE – modificado basicamente pela Temperatura da Superfície do oceano Atlântico Tropical – associado ao Gradiente inter-hemisférico (Reboita; Santos, 2014). Além da ZCIT, os Vórtices Ciclônicos de Alto Nível (VCAN) e as Ondas de Leste (OL), formam os principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região (Reboita; Santos, 2014). De modo geral, uma melhor representatividade, pela maioria dos modelos, da climatologia

observada ocorreu na BH Orós, ocorrendo nos meses de janeiro a junho (semestre chuvoso) embora de forma subestimada. Um comportamento sazonal semelhante foi identificado entre os modelos, apontando o pico anual nos meses de março (BHs Castanhão e Orós) e de abril (BH Banabuiú). No entanto, esta sazonalidade não foi bem representada pelo conjunto de modelos nas BHs Banabuiú e Castanhão nos meses de janeiro a abril, que em suma, associa-se ao período característico da ocorrência de chuvas nessas regiões como citado anteriormente. Também no período chuvoso, notou-se uma maior divergência entre os modelos quanto à quantidade precipitada na BH Castanhão. A precipitação observada foi melhor representada, embora subestimada, pelo modelo CSIRO-Mk3, na maioria das bacias analisadas.

A Figura 4 traz o gráfico boxplot da precipitação média anual observada, para o período de 1891 a 2016, nas BHs Banabuiú, Castanhão e Orós.

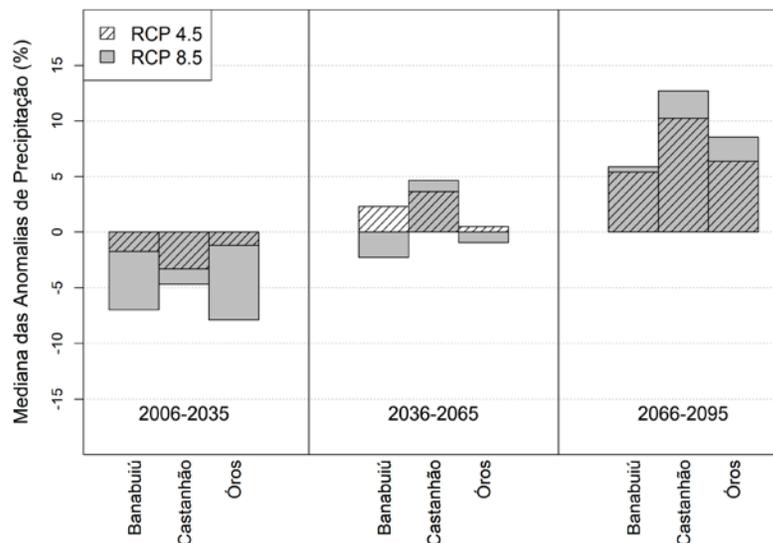


**Figura 4.** Boxplot da precipitação média anual proveniente do GPCC para o período de 1891 a 2016.

Embora tenha sido observado precipitações discrepantes (outliers) nas três bacias, foi principalmente nas BHs Banabuiú e Orós, em que os eventos mais atípicos se aproximaram dos 1500 mm, aproximadamente. Uma assimetria positiva foi identificada nos totais anuais de precipitação, em virtude da média anual ter apresentado-se superior à mediana em todas as bacias. A menor e maior mediana foram apontadas nas BHs Banabuiú e Castanhão, respectivamente, indicando que 50% dos seus dados foram representados por precipitações em torno de 694.1 mm e 749.6 mm, respectivamente. A BH Castanhão deteve a maior variabilidade interanual. Enquanto que a BH Orós apresentou uma baixa variabilidade, demonstrando, possivelmente, a tendência de estabilidade no clima da região desta bacia.

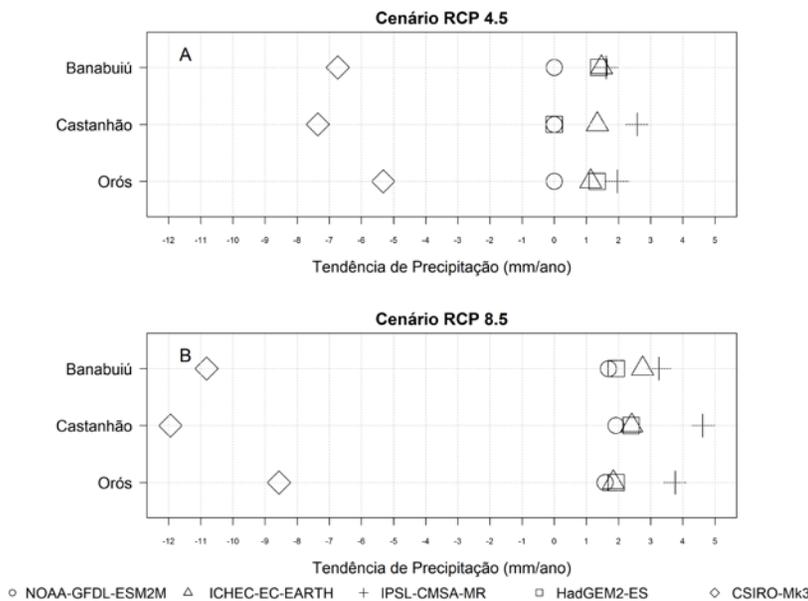
### Análises das projeções

A Figura 5 mostra as medianas das anomalias das precipitações médias anuais dos modelos do CORDEX nos períodos de 2006 a 2035, 2036 a 2065 e 2066 a 2095, para as BHs do Banabuiú, Castanhão e Orós para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Projetou-se reduções mais intensas de precipitação no cenário RCP 8.5 quando comparado ao cenário RCP 4.5 e nos três períodos. Considerando ambos cenários para o primeiro período (2006-2035), a mediana das anomalias indicou redução em todas as bacias – com as magnitudes das medianas variando até -10, com destaque para as BHs Banabuiú e Óros. No cenário RCP 4.5, a BH Castanhão deteve a maior possibilidade de redução da precipitação dentre as demais, com módulo de até 5 %. Para o período de 2036 a 2065 observou-se uma leve dispersão das medianas entre os cenários, o que pode estar associado ao aumento das incertezas destas projeções a longo prazo.



**Figura 5.** Medianas (%) das Anomalias de precipitações médias anuais dos modelos do CORDEX para as bacias Banabuiú, Castanhão e Orós para os cenários RCP 4.5 (barra hachurada) e RCP 8.5 (barra em cor cinza).

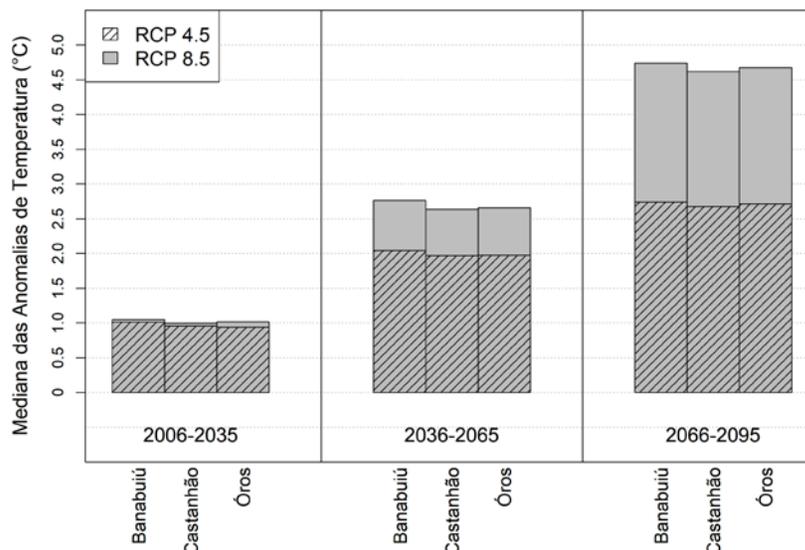
Um provável aumento da precipitação, foi apontado para todas as bacias somente no cenário RCP 4.5 enquanto que na BH Castanhão, o aumento foi observado em ambos cenários e com maior intensidade. A redução mais significativa na precipitação foi projetada na BH Banabuiú com a mediana abaixo de -5 %. No terceiro período, a mediana das anomalias de precipitação projeta aumento nas três bacias e nos dois cenários. Destaca-se a intensidade da mediana de anomalia da precipitação na BH Castanhão, com magnitude acima de 10. As Figuras 6A e 6B mostram a tendência Mann-Kendall Sen da série temporal de precipitação projetada pelo CORDEX para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.



**Figura 6.** Tendência da precipitação (mm ano<sup>-1</sup>) para o período de 2006 a 2100 nas BHs Banabuiú, Castanhão e Orós para os cenários A) RCP 4.5 e B) RCP 8.5.

O modelo NOAA-GFDL-ESM2M foi o único que não identificou tendências para a precipitação no cenário RCP 4.5. Em ambos os cenários, a Figura 6 mostra que o modelo CSIRO-Mk3 foi o mais pessimista em todas as bacias, mas apontou a maior redução (11.94 mm/ano) na BH Castanhão e no cenário RCP 8.5. De forma semelhante no estudo de Guimarães *et al.* (2016), este modelo também se mostrou pessimista, apontando a possibilidade de surgimento de uma extensa área hiperárida em algumas regiões do Estado do Ceará. Para o cenário RCP 8.5, todos os modelos mostraram tendências significativas em todas as BHs. Comparado ao cenário RCP 4.5, os módulos de tendência se apresentaram razoavelmente pronunciados, revelando uma possível intensificação no regime de precipitações médias anuais nas bacias estudadas. A BH Castanhão foi a bacia com maior indicativo de ausência de tendência em dois dos cinco modelos para o cenário RCP 4.5 (NOAA-GFDL-ESM2M e HadGEM2-ES). O modelo IPSL-CM5A-MR apresentou tendências mais intensas em todas as bacias e em ambos os cenários estimando o aumento da precipitação, com destaque para a BH Castanhão (4.62 mm/ano), o que corresponde a um aumento de 438.9 mm em um período de 95 anos.

A Figura 7 apresenta as medianas das anomalias das temperaturas médias anuais dos modelos do CORDEX nos períodos de 2006 a 2035, 2036 a 2065 e 2066 a 2095, para as BHs do Banabuiú, Castanhão e Orós para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

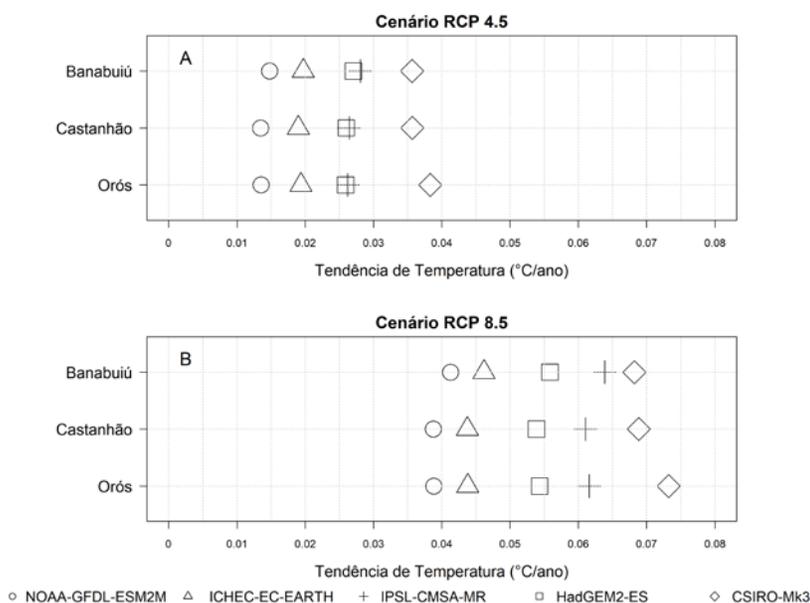


**Figura 7.** Medianas (°C) das Anomalias de temperaturas médias anuais dos modelos do CORDEX para as bacias Banabuiú, Castanhão e Óros para os cenários RCP 4.5 (barra hachurada) e RCP 8.5 (barra em cor cinza).

Ambos cenários concordam que a temperatura deve aumentar gradualmente até o final do século XXI em todas as bacias analisadas. Para o cenário RCP 8.5, os impactos na temperatura são maiores, principalmente no último período de 30 anos, onde a anomalia de temperatura é superior a 4.5 °C. Esses resultados convergem com os do estudo de Guimarães *et al.* (2016) para a região NEB. Na figura acima é possível observar que, para o primeiro período a mediana das anomalias de temperatura permaneceu em torno de aproximadamente 1.0 °C nos dois cenários. No segundo período (2036–2065), a mediana das anomalias de temperatura intensificou-se levemente detendo, aproximadamente, 2 °C no RCP 4.5 e 2.5 °C no RCP 8.5. As Figuras 8A e 8B mostram a tendência Mann-Kendall Sen da série temporal de temperatura projetada pelo CORDEX para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.

De acordo com o teste de Mann-Kendall-Sen realizado, todos os modelos do CORDEX apresentaram tendência positiva significativa para a variável temperatura e para ambos os cenários em todas as bacias. Aqui, o modelo NOAA-GFDL-ESM2M projetou as menores magnitudes de tendência da variável ao passo que o modelo CSIRO-Mk3 projetou as maiores tendências de aquecimento em todas as BHs (conforme também mostrado por Silva *et al.* (2020) para a região hidrográfica que abrange as bacias aqui analisadas). Especialmente para a BH Óros e sob a ótica dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, este modelo estimou uma tendência de aumento de 0.038 °C ano<sup>-1</sup> e 0.073 °C ano<sup>-1</sup> revelando incrementos de até

3.61 °C e 6.93 °C, respectivamente, até o final do século XXI. Avaliando o cenário RCP 4.5, o conjunto de modelos indicaram aquecimento entre 0.01 e 0.04 °C ano<sup>-1</sup>. A menor tendência de aquecimento (0.013 °C ano<sup>-1</sup>) foi igualmente observada nas BHs Orós e Castanhão. Tomando o cenário que destaca o aumento das emissões dos GEEs, RCP 8.5, notaram-se tendências com módulos superiores ao cenário RCP 4.5.

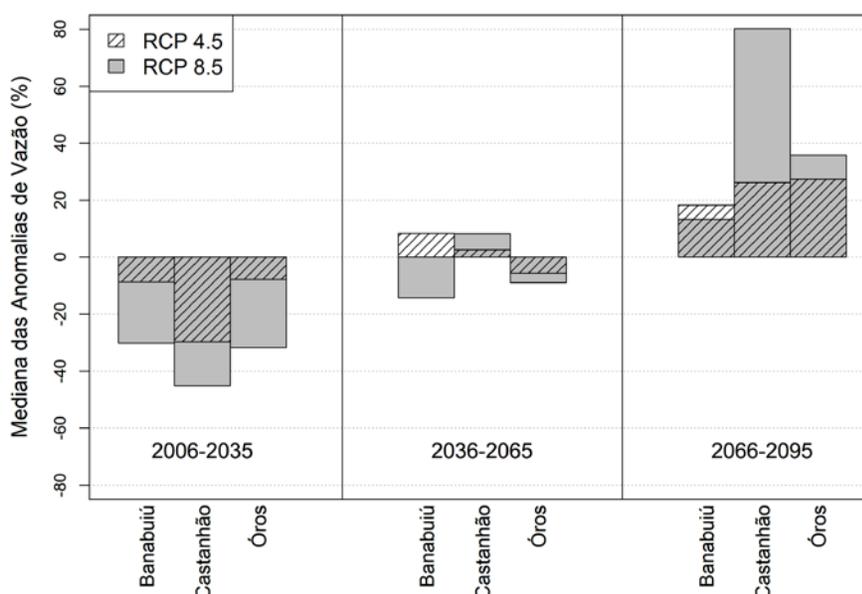


**Figura 8.** Tendência da temperatura (°C ano<sup>-1</sup>) para o período de 2006 a 2100 nas BHs Banabuiú, Castanhão e Orós para os cenários A) RCP 4.5 e B) RCP 8.5.

A Figura 9 traz as medianas das anomalias das vazões médias anuais dos modelos do CORDEX nos períodos de 2006 a 2035, 2036 a 2065 e 2066 a 2095, para as BHs do Banabuiú, Castanhão Orós para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

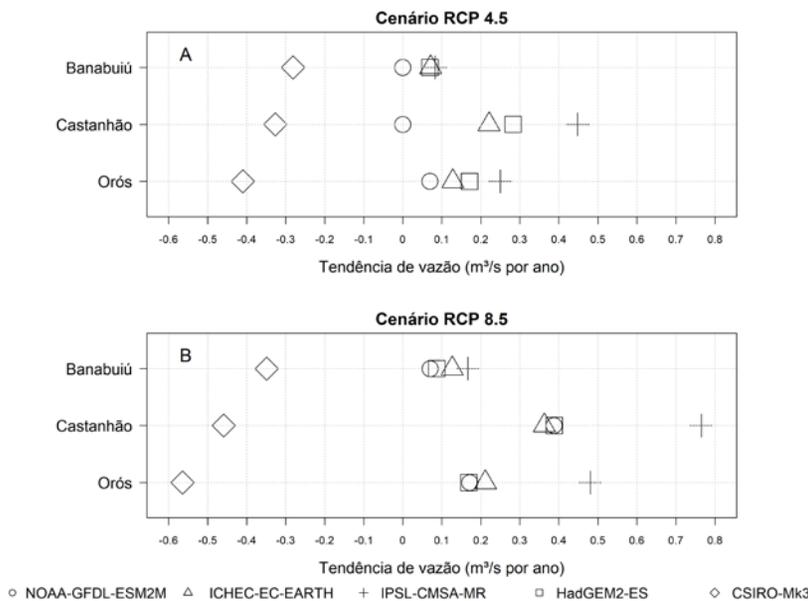
No primeiro período, os modelos indicam uma maior possibilidade de redução nas vazões para todas as bacias e em ambos cenários, com destaque para o RCP 8.5 que revela projeções superiores a 20% de anomalia negativa nas BHs Banabuiú e Óros e 40% na BH Castanhão. No cenário RCP 4.5, a BH Castanhão também deteve a maior possibilidade de redução da vazão média anual dentre as demais, com módulo superior a 20%. Para o período de 2036 a 2065 observou-se novamente, assim como na precipitação, uma suave dispersão das medianas entre os cenários especialmente para a BH Banabuiú. Aqui, as medianas divergem em relação ao impacto e indicam que as vazões tendem a aumentar no RCP 4.5 e diminuir no RCP 8.5. De outra forma, projeta-se o aumento das vazões médias anuais em ambos os cenários para a BH Castanhão e diminuição das mesmas para a BH Óros. O segundo período

em relação aos demais revela ainda, módulos menos pronunciados das medianas de suas anomalias. Os modelos indicam acréscimo nas vazões no último período de 30 anos para todas as bacias e nos dois cenários, sugerindo no RCP 8.5 vazões superiores à média em até aproximadamente 80% para a BH Castanhão, 40% para a BH Orós e 20% para a BH Banabuiú. Esta última, no entanto, apontou uma menor magnitude da vazão no cenário RCP 8.5 quando comparado ao RCP 4.5. As Figuras 10A e 10B mostram a tendência Mann-Kendall Sen da série temporal de vazão projetada pelo CORDEX para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.



**Figura 9.** Medianas (%) das Anomalias de vazões médias anuais dos modelos do CORDEX para as bacias Banabuiú, Castanhão e Orós para os cenários RCP 4.5 (barra hachurada) e RCP 8.5 (barra em cor cinza).

Em ambos os cenários, a Figura 10 mostra que o modelo CSIRO-Mk3, assim como observado para a precipitação (Figura 5), apresentou tendência negativa em todas as bacias apontando a maior redução ( $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$  por ano) na BH Orós (cenário RCP 8.5). Comparado ao cenário RCP 4.5, os módulos de tendência do RCP 8.5 se apresentaram razoavelmente pronunciados. O modelo NOAA-GFDL-ESM2M foi o único a indicar ausência de tendência em duas das três bacias, conforme mostrado na Figura 10A. O modelo IPSL-CM5A-MR dentre os demais, apresentou tendências mais intensas em todas as bacias e em ambos os cenários, destacando a BH Castanhão ( $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$  por ano), com um possível aumento do seu regime de vazão de até  $43.7 \text{ m}^3/\text{s}$  até o final do século XXI. Para o cenário RCP 8.5, todos os modelos mostraram tendências significativas em todas as BHs. Por outro lado, para o cenário com menor emissão de GEEs, o modelo NOAA-GFDL-ESM2M não apresentou significância estatística nas tendências estimadas para as vazões das BHs Banabuiú e Castanhão.



**Figura 10.** Tendência da vazão ( $m^3/s$  por ano) para o período de 2006 a 2100 nas BHs Banabuiú, Castanhão e Orós para os cenários A) RCP 4.5 e B) RCP 8.5.

## Conclusão

As análises propostas pelo presente estudo visaram analisar as projeções resultantes dos campos de precipitação, temperatura e vazão e seus respectivos impactos associados com as mudanças climáticas, de alguns modelos participantes do Projeto CORDEX considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 nas BHs Banabuiú, Castanhão e Orós, pertencentes a um importante sistema hídrico do Estado do Ceará.

O presente trabalho indica que a maioria dos modelos que compõem o projeto CORDEX convergiu razoavelmente quanto ao total precipitável observado nas bacias supracitadas, principalmente nos meses de agosto a outubro (período seco), em especial na BH Orós mesmo subestimando-a no período chuvoso. Também no período chuvoso, notou-se uma maior divergência entre os modelos quanto à quantidade precipitada na BH Castanhão. A precipitação observada foi melhor representada, embora subestimada, pelo modelo CSIRO-Mk3, na maioria das bacias analisadas, assim como mostrado também por Silva *et al.* (2020).

Uma redução mais intensa do regime de precipitação foi observada no cenário RCP 8.5 durante os três períodos analisados. Considerando ambos os RCPs para o período de 2006-2035, a mediana das anomalias indicou redução em todas as bacias destacando em módulo as BHs

Banabuiú e Óros. No cenário RCP 4.5, a BH Castanhão deteve a maior possibilidade de redução da precipitação dentre as demais. Uma leve dispersão das medianas de anomalia entre as BHs, em resposta a cada cenário de mudanças climáticas, foi apontada no segundo período. Por fim, para o terceiro período projetou-se o aumento da precipitação em todas as bacias e RCPs, com anomalias positivas de maior intensidade na BH Castanhão.

A temperatura média, que já vem aumentando em todo o globo no último século conforme apontado pela literatura, apresentou tendências positivas em todas as bacias estudadas e em todos os cenários considerados. Para o cenário RCP 8.5, os impactos na temperatura foram maiores, principalmente no período de 2066 a 2095, onde a anomalia de temperatura foi superior a 4.5 °C.

Na vazão, se observou impactos diferentes. Os modelos indicaram acréscimo nas vazões no último período de 30 anos para todas as bacias e nos dois cenários, sugerindo no RCP 8.5 vazões superiores à média em até aproximadamente 80% para a BH Castanhão, 40% para a BH Orós e 20% para a BH Banabuiú. Enquanto que no primeiro período sinalizou-se uma redução pronunciada do regime de vazões em todas as bacias. De outra forma, o segundo período em relação aos demais revelou ainda, módulos menos pronunciados das medianas de suas anomalias.

Os resultados encontrados nas BHs Banabuiú, Castanhão e Orós, especialmente precipitação e temperatura, são coerentes com os observados para a região Nordeste do Brasil nos estudos de Sales *et al.* (2015), Guimarães *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2020). Sendo consistentes, também, com os sinais de mudanças climáticas observadas em escala global (PMBC, 2014). Em suma, as maiores implicações da mudança climática são projetadas para as últimas três décadas do século XXI no cenário de altas emissões de GEE, o que requer esforços de mitigação. Conflitos entre múltiplos usuários da água, desaceleração da economia e o desabastecimento das cidades são alguns dos possíveis impactos decorrentes da elevação da temperatura do ar agravada pela redução na precipitação e aliada a possível redução da disponibilidade hídrica nas bacias estudadas.

Partindo disto, é recomendável o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos com o intuito de intensificar ações de mitigação e garantir a segurança hídrica, já que se trata de uma região com clima semiárido. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar as incertezas relacionadas com as variáveis de precipitação e vazão que apresentaram algumas divergências por parte dos modelos do CORDEX, haja vista a dificuldade na representação climática, da precipitação por exemplo, já constatada também por Guimarães *et al.* (2016), devido à inserção do NEB em uma região de variabilidade climática regida por diversos sistemas atmosféricos e oceânicos.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Referências Bibliográficas

- ANA, Agência Nacional de Águas (2016) *Mudanças climáticas e recursos hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação*. Brasília: ANA, 93 pp.
- Andrade, C. W. L., Montenegro, S. M. G. L., Lima, J. R. S., Montenegro, A. A. A. e Srinivasan, R. (2017) Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma Sub-Bacia da região Nordeste, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **10**(2), 440-453.
- ASCE (1993) Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management. Committee Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrig. Drainage Eng.*, **119**, 429-442.
- Bari, S. H., Rahman, M. T. U., Hoque, M. A.H. e Hussain, M. M. (2016) Analysis of seasonal and annual rainfall trends in the northern region of Bangladesh. *Atmospheric Research*, **16**(1), 148-158.
- Block, P. J., Souza Filho, F. A., Sun, L. e Kwon, H. H. (2009) A Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models<sup>1</sup>, *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, **45**, 828–843.
- Ceará (2016) *Manual de Operação da Sala de Situação do Ceará*. Fortaleza: COGERH. 112 pp.
- Ceará (2016) *Plano de Segurança Hídrica | Região Metropolitana de Fortaleza*. Fortaleza: ARCE. 58 pp.
- Ceará (2018) *Sub-Bacia Hidrográfica do Banabuiú Características Gerais*. In: Secretaria de Recursos Hídricos, Ceará. Acesso em 08 junho de 2020, disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2018/07/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-da-Bacia-Hidrogr%C3%A1fica-Banabui%C3%BA.pdf>
- Ceará (2019) *Sub-Bacia Hidrográfica do Médio Jaguaribe Características Gerais*. In: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, Ceará. Acesso em: 08 de junho de 2020, disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2019/02/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-da-Bacia-Hidrogr%C3%A1fica-Medio-Jaguaribe.pdf>
- Ceará (2018) *Sub-Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe Características Gerais*. In: Secretaria de Recursos Hídricos, Ceará, Acesso em: 08 de junho de 2020, disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2018/07/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-da-Bacia-Hidrogr%C3%A1fica-Alto-Jaguaribe.pdf>
- Collischonn, W. e Dornelles, F. (2013) *Hidrologia para engenharias e ciências ambientais*. 2ª ed. Porto Alegre, Associação brasileira de recursos hídricos: ABRH, 342 pp.
- Costa, A. A. (2017) As the Earth heats up, Brazil Digs Deeper. *NACLA Report on the Americas*, [S.l.], **49**(4), 444-450. <https://doi.org/10.1080/10714839.2017.1409018>.
- Da Rocha, R., Reboita, M.S., Dutra, L.M.M., Llopart, M. e Coppola, E. (2014) Interannual variability associated with ENSO: present and future climate projections of RegCM4 for South America-CORDEX domain. *Climatic Change*, [S.l.], **125**(1), 95-109. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1119-y>.
- Da Silva, G. K., Silveira, C. S., Silva, M. V. M., Marcos Júnior, A. D., Souza Filho, F. A. e Guimarães, S. (2020) Análise de Projeções das Mudanças Climáticas Sobre Precipitação e Temperatura nas regiões hidrográficas brasileiras para o século XXI. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, [S.l.], **55**(3), 420-436. <https://doi.org/10.5327/z2176-947820200624>
- Doll, P. (2009) Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environmental Research Letters*, [S.l.], **4**(3), 12 pp. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006>

- Giorgi, F., Jones, C. e Asrar, G. (2009) Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, [S.l.], **58**(3), 175-183.
- Guimarães, S. O., Costa, A. A., Vasconcelos Júnior, F. C., Silva, E. M., Sales, D. C., Araújo Júnior, L. M. e Souza, S. G. (2016) Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, **31**(3), 337-365. <https://doi.org/10.1590/0102-778631320150150>
- Hargreaves, G. H. e Samani, Z. A. (1985) Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, [S.l.], **1**(2), 96-99. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hargreaves, G. H. (1994) Defining and Using Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, [S.l.], **120**(6), 1132-1139. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1994\)120:6\(1132\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1994)120:6(1132))
- IPCC, Intergovernmental Panel On Climate Change (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.
- Jolliffe, I. e Stephenson, D. (2003) *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. [S.l.]: John Wiley and Sons. 247 pp.
- Kendall, M. G. (1975) *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, UK. 202 pp.
- Lafon, T., Dadson, S., Buys, G. e Prudhomme, C. (2013) Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. *International Journal of Climatology*, [S.l.], **33**(6), 1367-1381.
- Lyra, A. A., Chou, S. C. e Sampaio, G. O. (2016) Sensitivity of the Amazon biome to high resolution climate change projections. *Acta Amaz.*, Manaus, **46**(2), 175-188. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201502225>
- Lopes, J. E. G., Braga Junior, B. P. F. e Conejo, J. G. L. (1981) Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado, *III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Fortaleza, Ceará.
- Lopes, J. E. G. *Manual do Usuário do SMAP – v.99*. 18 pp.
- Machado, R. E. e Vettorazzi, C. A. (2003) Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, SP. *R. Bras. Ci. Solo*, **27**, 735-741.
- Mann, H. B. (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, [S.l.], **13**, 245-259.
- Marengo, J. A., Alves, L. M., A., R. C. S, Cunha, A. P., Brito, S. e Moraes, O. L. L. (2018) Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, Rio de Janeiro, **90**(2), 1973-1985.
- Modala, N. R. (2014) *Assessing the Impacts of Climate Change on Cotton Production in the Texas High Plains and Rolling Plains*. Doctoral dissertation, Texas A & M University. 128 pp.
- Moore, D. S. (2007) *The Basic Practice of Statistics*. 4th ed. New York: Freeman. 728 pp.
- Moreira, J. G. V. e Naghettini, M. (2016) Detecção de Tendências Monotônicas Temporais e Relação com Erros dos Tipos I e II: Estudo de Caso em Séries de Precipitações Diárias Máximas Anuais do Estado do Acre. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **31**(4), 394-402
- New, M., Hulme, M. e Jones, P.D. (1999) Representing Twentieth-Century space-time climate variability. Part 1: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, [S.l.], **12**, 829-856. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012%3C0829:RTCSTC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012%3C0829:RTCSTC%3E2.0.CO;2)
- Paulino, V. E. N., Studart, T. M. C., Campos, J. N. B., Pestana, C. J., Luna, R. M. e Alves, J. M. B. (2019) Trends in Crop Reference Evapotranspiration and Climatological Variables Across Ceará State – Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [S.l.], **34**(1), 79-88. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334017>.
- PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. (2016) *Mudanças Climáticas e Cidades*. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. Rio de Janeiro: PBMC, COPPE – UFRJ. 116 pp.

- Piani, C., Haerter, J. O. e Coppola, E. (2010) Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, **99**(1-2), 187-192.
- Portela, M. M., Quintela, A. C., Santos, J. F., Vaz, C. e Martins, C. (2011) Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. *Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (APRH)*, **32**(1), 43-60.
- Reboita, M. S., Fernandez, J. P. R., Llopart, M., Rocha, R. P., Pampuch, L. A. e Cruz, F. T. (2014) Assessment of RegCM4.3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parameterization schemes. *Climate Research*, [S.l.], **60**(3), 215-234. <https://doi.org/10.3354/cr01239>.
- Sales, D. C., Costa, A. A., Silva, E. M., Vasconcelos Júnior, F. C., Cavalcante, A. M. B., Medeiros, S. S., Marin, A. M. P., Guimarães, S. O., Araújo Junior, L. M. e Pereira, J. M. R. (2015) Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, **30**(4), 435-456. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620140075>.
- Sen, P. K. (1968) Estimates of regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Am. Stat. Assoc.*, **63**, 1379-1389.
- Silva, P. M. O., Mello, C. R., Silva, A. M. e Coelho, G. (2008) Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, **12**, 258-265.
- Silva, S. M. O., Souza Filho, F. A. e Aquino, S. H. S. (2017) Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do sistema jaguaribe-metropolitano. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [S.l.], **22**(4), 749-760.
- Silva, S. M. O., Souza Filho, F. A., Cid, D. A. C., Aquino, S. H. S. e Xavier, L. C. P. (2019) Proposta de gestão integrada das águas urbanas como estratégia de promoção da segurança hídrica: o caso de Fortaleza. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [S.l.], **24**(2), p. 239-250. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019181776>
- Silva, A. E. F., Gomes, D. T., Silveira, C. S. e Sakamoto, M. S. (2020) Desempenho das Simulações do Projeto Cordex Quanto à Representação dos Padrões de Variação da Precipitação no Século XX sobre o Município de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, Epub September 07, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-7786353003>
- Silva, G. K., Marcos Júnior, A. D., Sousa Lima, C. E., Silva, M.V. M. e Silveira, C. S. (2020) Análise de projeções das mudanças climáticas sobre o regime de precipitação nas Bacias do Sistema Jaguaribe, Ceará, Brasil. *XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Caruaru, Pernambuco.
- Silveira, C. S., Souza Filho, F. A., Vasconcelos Junior, F. C., Araujo Junior, L. M. e Cabral, S. L. (2018) Mudanças climáticas e o setor hidroelétrico brasileiro: uma análise com base em modelos do IPCC-AR5. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, Rio de Janeiro, (47), 46-60. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180210>
- Silveira, C. S., Vasconcelos Júnior, F. C., Souza Filho, F. A., Guimaraes, S. O., Marcos Júnior, A. D., Reis, G. N. L. e Porto, V. C. (2019) Performance evaluation of AR5-CMIP5 models for the representation of seasonal and multi-annual variability of precipitation in Brazilian hydropower sector basins under RCP8.5 scenario. *Hydrological Sciences Journal*, [S.l.], **64**(11), 1279-1296.
- Tao, H., Fraederich, K., Menz, C. e Zhai, J. (2014) Trends in extreme temperature indices in the Poyang Lake Basin, China. *Stoch. Environ. Res. Risk Asses.*, **28**, 1543-1553.
- Teutschbein, C. e Seibert, J. (2012) Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, **456**, 12-29.
- Thom, H. C. S. (1958) A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review*, [S.l.], **86**(4), 117-122.