



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.5.3.2020.2812.288-301



Correção de tendência das projeções climáticas futuras simuladas pelo modelo regional Eta-Hadgem2-Es para a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil

Trend correction of future climate projections simulated by the Eta-Hadgem2-Es regional model for the Mundaú River Basin, Northeastern Brazil

Carolynne Wanessa Lins de Andrade Farias^a, Suzana Maria Gico Lima Montenegro^b, Frederico Costa Abraão Lins^c, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro^c

^a Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada. Av. Gregório Ferraz Nogueira, S/N, José Tomé de Souza Ramos, Serra Talhada-PE. CEP: 56909-535. E-mail: carolynne.andrade@ufrpe.br.

^b Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Departamento de Engenharia Civil. Av. Prof. Moraes Rego, n. 1235, Cidade Universitária, Recife-PE. CEP: 50670-901.

^c UFRPE, Departamento de Engenharia Agrícola. Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife/PE. CEP: 52171-900.

ARTICLE INFO

Recebido 14 Out 2019

Aceito 26 Ago 2020

Publicado 27 Ago 2020

ABSTRACT

The effects of future climate change resulting from anthropic actions on water resources have been one of the main issues studied today. Understanding these changes is extremely important for prevention and mitigation actions to be taken. One way of assessing such effects is by including climate forecasts in hydrological models. However, data from global/regional climate models often have systematic errors (biases) and cannot be used directly in hydrological modeling. The study aimed to perform the trend correction of precipitation and temperature data simulated by the regional model Eta-HadGEM2-ES for the Mundaú River Basin, testing two methods for trend correction and using the Climate Model for Hydrologic Modeling (CMHyd) software. Precipitation and temperature data simulated by the regional model Eta-HadGEM2-ES were made available by the National Institute for Space Research (INPE). Trend correction was performed by testing two methods for correction: Linear Scaling (LS) and Distribution Mapping (DM). Both methods were able to correct the trend of precipitation and temperature data of the climate projection of the regional Eta-HadGEM2-ES model, but the Distribution Mapping method was more effective in the correction when compared to the LS.

Keywords: Climate change, precipitation, temperature, CMHyd.

RESUMO

Os efeitos das mudanças climáticas futuras decorrentes de ações antrópicas sobre os recursos hídricos têm sido uma das principais questões estudadas atualmente. A compreensão dessas mudanças é de extrema importância para que ações de prevenção e mitigação sejam tomadas. Uma das formas de avaliar tais efeitos é por meio da inclusão das previsões climáticas em modelos hidrológicos. Entretanto, os dados oriundos de modelos climáticos globais/regionais geralmente possuem erros sistemáticos (vieses), e não podem ser utilizados diretamente na modelagem hidrológica. Neste contexto, objetivou-se realizar a correção de tendência de dados de precipitação e temperatura simulados pelo modelo regional Eta-HadGEM2-ES para a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, testando dois métodos para a correção de tendência, utilizando o *software Climate Model for Hydrologic Modeling* (CMHyd). Os dados de precipitação e temperatura simulados pelo modelo regional Eta-HadGEM2-ES foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A correção de tendência foi realizada testando-se dois métodos para a

correção: *Linear Scaling* (LS) e *Distribution Mapping* (DM). Ambos os métodos foram capazes de corrigir a tendência dos dados de precipitação e temperatura da projeção climática do modelo regional Eta-HadGEM2-ES, mas o método DM mostrou-se mais eficaz na correção quando comparado ao LS.

Palavras-Chave: Mudanças climáticas, precipitação, temperatura, CMHyd.

Introdução

Os efeitos das mudanças climáticas futuras decorrentes de ações antrópicas sobre os recursos hídricos têm sido uma das principais questões estudadas atualmente. De acordo com as projeções climáticas do quarto Relatório de Avaliação (AR4) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), derivadas de diferentes modelos climáticos globais do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) para diferentes vias de concentração representativa (RCPs) (4.5 e 8.5), haverá aumento da temperatura e aumento ou diminuição da precipitação para a América do Sul até o final do século XXI (IPCC, 2014). Segundo este mesmo relatório, a região Nordeste do Brasil poderá ter aquecimento de +1,7°C a +6,7°C, e redução de 22% na precipitação (IPCC, 2014).

A compreensão dessas mudanças é de extrema importância para que ações de prevenção e mitigação sejam tomadas, especialmente em regiões como o Semiárido brasileiro, que enfrenta graves problemas relacionados à escassez hídrica. De acordo com Sales et al. (2015), essa região é caracterizada pela grande variabilidade espacial e temporal das chuvas e pela ocorrência de seca ou estiagem, dificultando, assim, o desenvolvimento agropecuário regional.

A bacia hidrográfica do Rio Mundaú é predominantemente rural, sendo considerada uma bacia leiteira na porção pernambucana, e caracterizada por grandes áreas de cultivo de cana-de-açúcar na sua porção alagoana (Andrade et al., 2018). Localizada em uma região de transição entre o agreste e o semiárido pernambucano, ela apresenta alta variabilidade pluviométrica, e por isso, se torna uma região vulnerável aos efeitos das alterações do clima (Marengo, 2008).

Dentro deste contexto, uma das formas de avaliar tais efeitos é por meio da inclusão dos dados das previsões de modelos climáticos globais/regionais em modelos hidrológicos. De acordo com Santos et al. (2019), os modelos climáticos regionais (RCMs) representam o primeiro passo para verificar a vulnerabilidade dos recursos hídricos às mudanças climáticas e às necessidades de adaptação. No entanto, os dados oriundos de modelos climáticos geralmente possuem erros sistemáticos, e não devem ser utilizados diretamente na modelagem hidrológica (Chen et al., 2016; Oliveira et al., 2017). Estudos

apontam que um dos fatores que aumenta a incerteza dos efeitos das previsões climáticas sobre os recursos hídricos é o procedimento de correção de tendência dos dados de saída dos modelos climáticos (Teutschbein & Seibert, 2012; Zhang et al., 2015; Santos et al., 2019).

Rathjens et al. (2016) desenvolveram o *Climate Model for Hydrologic Modeling* (CMhyd) para executar a correção de tendência dos dados de precipitação e temperatura de vários modelos climáticos. Tal modelo extrai e corrige os dados de precipitação e temperatura de forma semiautomática e fornece oito métodos de correção de tendência, incluindo o *Linear Scaling* (LS), *Delta Change*, *Local Intensity Scaling*, *Power Transformation*, *Variance Scale* e *Distribution Mapping* (DM).

Oliveira et al. (2017) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na vazão e no potencial hidrelétrico na bacia do Rio Grande, Sudeste do Brasil, e corrigiram os dados de precipitação e temperatura projetados pelos Modelos Climáticos Regionais Eta-HadGEM2-ES e MIROC5 por meio do método LS. Zhang et al. (2018) quantificaram os impactos das mudanças climáticas na dinâmica da vazão dos dois principais rios da bacia do Erie, no Canadá, e testaram cinco métodos para a correção de tendência dos dados oriundos do Modelo Climático Regional Canadense (CanRCM4), adotando como método o DM, devido aos melhores resultados de correção. Por sua vez, Santos et al. (2019) utilizaram o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para avaliar o desempenho de Modelos Climáticos Regionais (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) em uma bacia hidrográfica do Semiárido brasileiro e adotaram diferentes métodos para a correção de tendência dos dados de temperatura e precipitação, incluindo o LS e o DM. Neste contexto, objetivou-se realizar a correção de tendência de dados de precipitação e temperatura simulados pelo modelo regional Eta-HadGEM2-ES para uma bacia hidrográfica.

Material e Métodos

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Mundaú (BHRM) possui uma área de drenagem de 4.090,39 km² e está localizada entre as coordenadas geográficas de 08° 42' e 09° 36' de latitude sul e 35° 47' e 36° 39' de longitude oeste (Gomes et al.,

2016), espalhando-se pelos estados de Pernambuco e Alagoas, Nordeste do Brasil (Figura 1). A BHRM limita-se ao norte com a bacia do Rio Una, ao sul com o Estado de Alagoas e grupo de bacias de

pequenos rios, a leste com a bacia do Rio Una e Alagoas, e a oeste, com o conjunto dos interiores rios e bacia do Rio Una (Araújo et al., 2015).

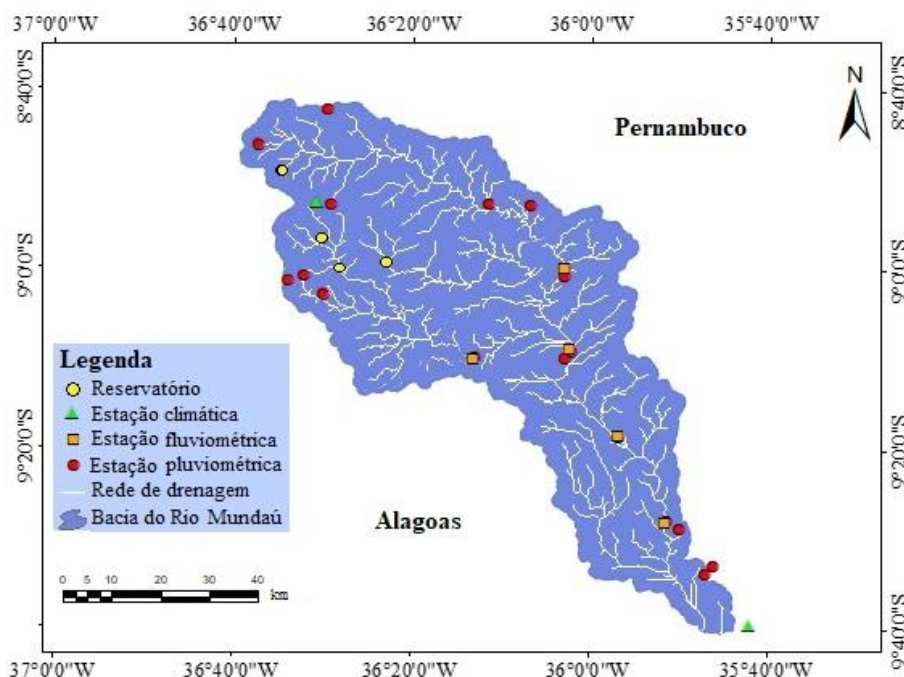


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Mundaú entre os estados de Pernambuco e Alagoas, indicando a posição de pluviômetros e estações meteorológicas. Fonte: Farias et al. (2020).

A maior parte da bacia hidrográfica do Rio Mundaú é classificada como semiúmida (quatro a cinco meses de seca), e uma pequena porção é classificada como semiárida (sete a oito meses de seca), caracterizada também por temperaturas elevadas (médias acima de 18°C todos os meses) (Quadro et al., 1996), resultando, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002), em duas zonas climáticas: a zona Tropical Nordeste Oriental e a Tropical Zona Equatorial.

A região apresenta clima, segundo a classificação de Köppen, do tipo Aw (tropical, com estação seca no inverno), sendo uma pequena porção a noroeste da bacia composta pelo clima BSh (clima das estepes quentes com baixas latitudes e altitudes) (Rodrigues, 2002).

A precipitação média anual na BHRM é de 900 mm. Na faixa litorânea encontram-se os valores pluviométricos máximos, com médias anuais em torno de 2000 mm. A bacia possui grande relevância porque apresenta alta variabilidade hidrológica. Houve episódios de picos de vazão com problemas de cheias, como a ocorrida em Santana do Mundaú-AL, em 2010, onde a vazão alcançou 101 m³.s⁻¹, causando prejuízos em diversas áreas. A bacia também passou por secas severas, uma vez que parte dela se encontra na porção semiárida de Pernambuco,

como a recente e excepcional seca de 2012, a maior dos últimos 50 anos, resultando em baixos valores de vazão. Na estação fluviométrica de Santana do Mundaú, por exemplo, a vazão média mensal de dezembro chegou a ser 3 m³.s⁻¹, 88% menor do que média mensal para o mês no ano anterior, segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015).

Modelo Eta-HADGEM2-ES

O Modelo de Circulação Global HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model version 2 Earth System) (Collins et al., 2011; Martin et al., 2011) é um modelo em ponto de grade com resolução N96, equivalente a 1,875 e 1,275 graus de longitude e latitude, respectivamente, e 38 níveis verticais na atmosfera, chegando a cerca de 40 km de altitude. O HadGEM2-ES foi usado pelo *Met Office Hadley Centre* para as simulações do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) (IPCC, 2013), que utiliza dados históricos de 1960 a 2005 e projeções através dos RCPs do AR5 (Moss et al., 2010).

No presente estudo, foram utilizadas previsões do Modelo de Circulação Global HADGEM2-ES, reduzido dinamicamente pelo Modelo Climático Regional Eta-HADGEM2-ES (Chou et al., 2014a; Chou et al., 2014b; Lyra et al.,

2018). O MCR Eta foi desenvolvido na Universidade de Belgrado, e é empregado operacionalmente pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Black, 1994). Uma das características do modelo é a coordenada vertical (Mesinger 1984), que representa a topografia em etapas. As superfícies aproximadamente horizontais da coordenada reduzem os erros no cálculo das derivadas horizontais, em particular a força do gradiente de pressão; portanto, a coordenada Eta é especialmente adequada para trabalhar em regiões de topografia íngreme. O Eta-HadGEM2-ES é disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/CPTEC) (<https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>). As saídas Eta-HadGEM2-ES incluem precipitação diária, temperatura mínima e máxima, entre outras variáveis.

Correção de tendência

Sabe-se que as saídas dos MCGs e MCRs - como dados de precipitação e temperatura - geralmente contêm erros sistemáticos e não podem ser usados diretamente na modelagem hidrológica, uma vez que podem gerar desvios significativos entre dados simulados e observados (Chen et al., 2016; Oliveira et al., 2017). Portanto, para estudos que envolvem a avaliação dos impactos das mudanças climáticas nos processos hidrológicos, recomenda-se fortemente a correção de tendência dos dados oriundos de modelos climáticos (Graham et al., 2007; Teutschbein & Seibert, 2010). A correção de tendência é geralmente adotada para reduzir diferenças e incertezas entre dados simulados e observados usando relações empíricas em diversas escalas (Piani et al., 2009).

Normalmente, quando um método de correção de tendência possui bom desempenho na correção de dados históricos, o desempenho é ainda melhor na correção dos dados futuros (Teutschbein & Seibert, 2012). Torna-se, assim, imprescindível avaliar a precisão da correção de tendência de dados brutos, como os oriundos do Eta-HadGEM2-ES e compará-los com os dados observados. Tal avaliação permite refinar ainda mais a busca pelo melhor método de correção de tendência (Zhang et al., 2018).

Climate Model for Hydrologic Modeling (CMhyd)

No presente estudo, dois métodos de correção de tendência foram avaliados: o LS e o DM. Tais métodos foram selecionados, após revisão do estudo de Teutschbein & Seibert (2010), que avaliaram cinco métodos de correção de tendência para a precipitação e quatro técnicas de correção de tendência para a temperatura, e

segundo os autores, tais métodos foram considerados adequados para a correção de dados de precipitação e temperatura.

O método LS trabalha com valores mensais de correção estabelecidos sobre as diferenças entre dados simulados observados e históricos (Teutschbein & Seibert, 2010; Oliveira et al., 2017). O método pode ser descrito pelas equações (Equações 1-4):

$$P^*_{contr}(d) = P_{contr}(d) \cdot \left[\frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}(d))} \right] \quad \text{Eq.(1)}$$

$$P^*_{scen}(d) = P_{scen}(d) \cdot \left[\frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}(d))} \right] \quad \text{Eq.(2)}$$

$$T^*_{contr}(d) = T_{contr}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d)) \quad \text{Eq.(3)}$$

$$T^*_{scen}(d) = T_{scen}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d)) \quad \text{Eq.(4)}$$

onde P (d) e T (d) são precipitação e temperaturas diárias, respectivamente; μ_m é a média da variável m dentro do mês; e 'contr', 'scen' e 'obs' referem-se ao controle (período de referência), cenários e dados observados, respectivamente.

Na abordagem LS, os dados de simulação corrigidos por tendência concordarão, em seus valores médios mensais, com os dados observados. As variáveis de precipitação e temperatura são ajustadas por um fator baseado na razão da média mensal a longo prazo observada e nos dados do controle. Espera-se que esses fatores continuem invariáveis sob condições futuras (Lenderink et al., 2007; Teutschbein & Seibert, 2012).

O método DM objetiva corrigir a função de distribuição dos dados simulados pelo modelo climático, de forma a concordar com a função de distribuição dos dados observados. Isso pode ser feito por meio da criação de uma função de transferência para mudar as distribuições de ocorrência de precipitação e temperatura (Sennikovs & Bethers, 2009). A distribuição gama (Thom, 1958), com parâmetro de forma α e parâmetro de escala β , é frequentemente considerada adequada para distribuições de eventos de precipitação (Teutschbein & Seibert, 2012). Para séries temporais de temperatura, a distribuição gaussiana (Cramér, 1999), com parâmetro de localização μ e parâmetro de escala σ , é geralmente assumida como a de melhor ajuste (Teutschbein & Seibert, 2012). As seguintes equações regem o método DM (Equações 5-8):

$$P^*_{contr}(d) = F_y^{-1} \left((F_y(P_{contr}(d) | \alpha_{contr,m}, \beta_{contr,m}) | \alpha_{obs,m}, \beta_{obs,m}) \right) \quad \text{Eq.(5)}$$

$$T^*_{scen}(d) = F_N^{-1} \left((F_N(T_{scen}(d) | \mu_{contr,m}, \sigma^2_{contr,m}) | \mu_{obs,m}, \sigma^2_{obs,m}) \right) \quad \text{Eq.(8)}$$

$$P^*_{scen}(d) = F_y^{-1} \left((F_y(P_{scen}(d) | \alpha_{contr,m}, \beta_{contr,m}) | \alpha_{obs,m}, \beta_{obs,m}) \right) \quad \text{Eq.(6)}$$

$$T^*_{contr}(d) = F_N^{-1} \left((F_N(T_{contr}(d) | \mu_{contr,m}, \sigma^2_{contr,m}) | \mu_{obs,m}, \sigma^2_{obs,m}) \right) \quad \text{Eq.(7)}$$

Os períodos históricos e observados utilizados para a aplicação dos métodos de correção de tendência foram de 1980 a 2005, em que os dados de precipitação observados compreenderam onze estações e os dados de temperatura, duas estações, distribuídas por toda a BHRM. A estrutura conceitual da correção de tendência das previsões futuras do Eta-HadGEM2-ES é apresentada na Figura 2.

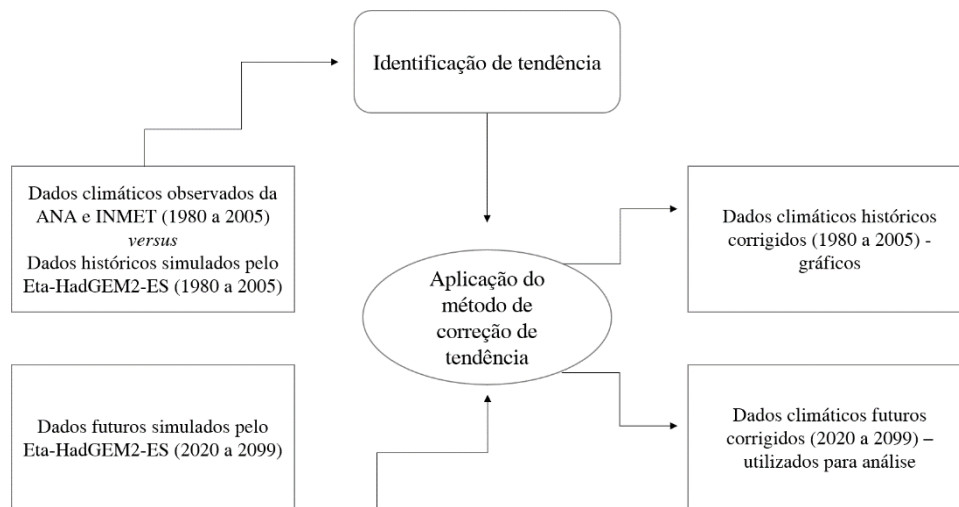


Figura 2. Fluxograma de correção de tendência para as previsões futuras do Eta-HadGEM2-ES. Fonte: Adaptado de Vaghefi et al. (2017).

Avaliação dos métodos de correção de tendência

Como descrito anteriormente, dois métodos de correção de tendência para os dados de precipitação e temperatura foram adotados. As estatísticas fornecidas pelo *software* CMHyd para os dados de precipitação foram: média mensal (mm), desvio padrão (mm), coeficiente de variação, percentil 90% (mm), probabilidade de dia úmido, intensidade de precipitação (mm). Para os dados de temperatura foram obtidos a média mensal (°C), o desvio padrão (°C) e os percentis 10% e 90% (°C). Também foram obtidas as séries temporais de precipitação mensal (mm) e de temperaturas máxima e mínima mensais (°C), considerando dados observados, dados brutos do Eta-HadGEM2-ES e dados corrigidos pelo método adotado.

Resultados e Discussão

Correção de tendência dos dados do Eta-HadGEM2-ES pelo método Linear Scaling (LS)

No total, os dados corrigidos corresponderam a 11 estações pluviométricas (Garanhuns-PE, Caetés-PE, Brejão-PE,

Canhotinho-PE, Jucati-PE, Santana do Mundaú-AL, São José da Laje-AL, União dos Palmares-AL, Murici-AL, Rio Largo-AL e Maceió-AL) e duas estações de temperaturas máxima e mínima (Garanhuns-PE e Maceió-AL), todas inseridas na bacia hidrográfica do Rio Mundaú (Figura 1). Como os resultados dos diferentes métodos de correção de tendência para as séries temporais de precipitação foram semelhantes entre as 11 estações, apresentam-se os resultados para as estações de Garanhuns-PE e Maceió-AL. A Figura 3 mostra a correção de tendência dos dados históricos de precipitação (1980-2005), projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, pelo método LS, para as estações Garanhuns-PE e Maceió-AL.

Observando o ajuste entre as curvas na Figura 3, pode-se notar que o método LS corrigiu, adequadamente, os dados históricos brutos de precipitação do modelo Eta-HadGEM2-ES (1980-2005). A Tabela 1 apresenta um resumo estatístico da média diária e do desvio padrão médio diário para as estações pluviométricas de Garanhuns-PE e Maceió-AL, para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método LS.

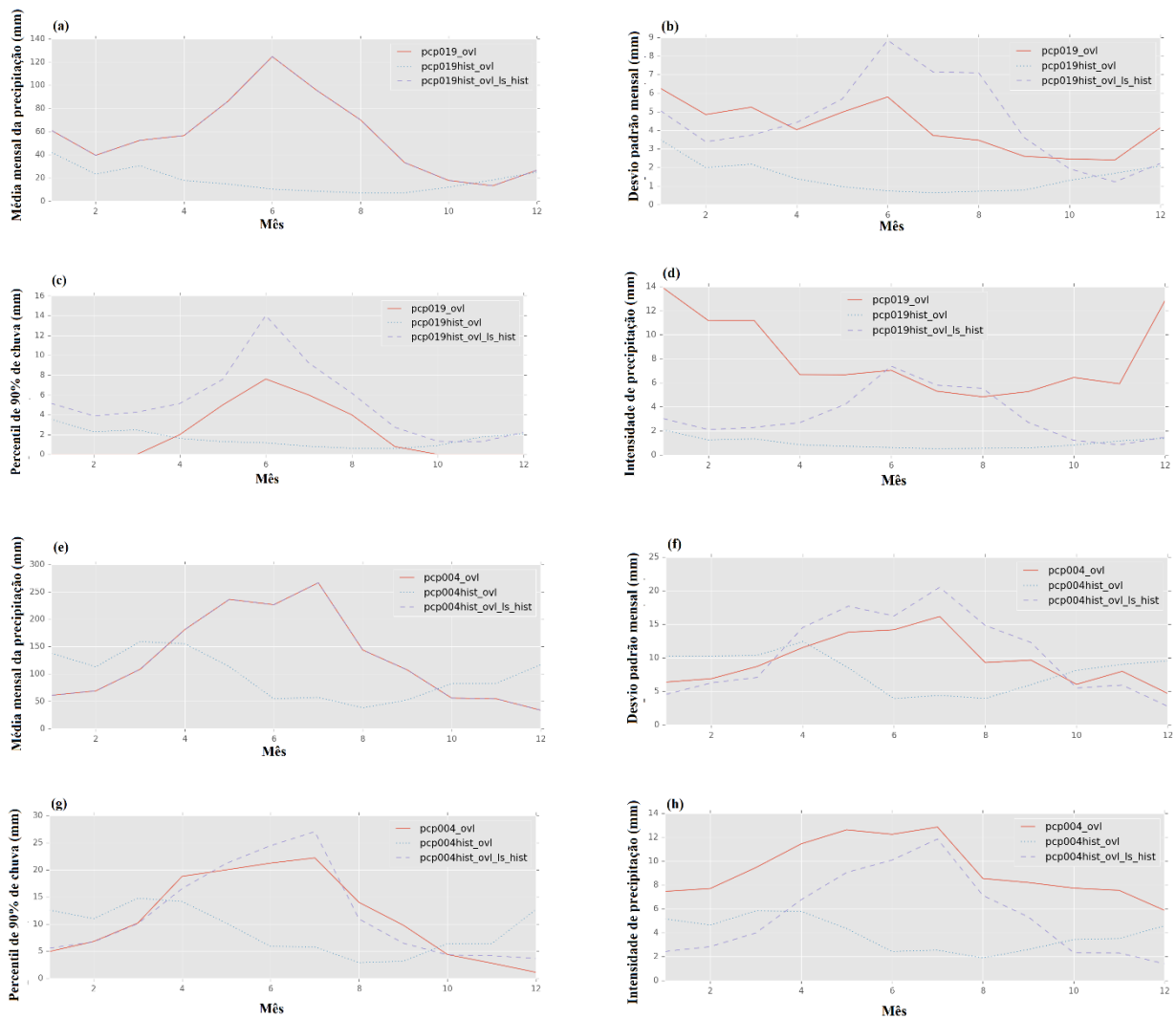


Figura 3. Correção de tendência pelo método *Linear Scaling* (LS) para as estações de precipitação em: a-d. Garanhuns-PE e e-h. Maceió-AL (pcp019_ovl/ pcp004_ovl = dados históricos observados (1980-2005); pcp019hist_ovl/ pcp004hist_ovl = dados históricos brutos (1980-2005); pcp019hist_ovl_ls_hist/ pcp004hist_ovl_ls_hist = dados históricos corrigidos (1980-2005) pelo método LS. Fonte: Farias et al. (2020).

Tabela 1. Resumo estatístico da média diária e do desvio padrão médio diário para as estações pluviométricas de Garanhuns-PE e Maceió-AL para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método *Linear Scaling* (LS). Fonte: Farias et al. (2020).

Locais	Média diária das precipitações e desvios padrão (mm)		
	Observado	Bruto	Corrigido (LS)
Estação Garanhuns-PE	1,88	0,60	1,87
	2,86	0,82	2,59
Estação Maceió-AL	4,23	3,20	4,26
	5,99	4,40	5,93

A média mensal de precipitação (mm) corrigida pelo método LS obteve um ajuste muito bom aos dados observados, tanto para a estação Garanhuns-PE (Figura 3a) quanto para a estação Maceió-AL (Figura 3e). O valor de precipitação média diária bruta para Garanhuns-Pe era de 0,60 mm, enquanto que o valor observado consistia em 1,88 mm. Com a correção, a P_{méd} passou a ser 1,87 mm, estando muito próximo a média dos

dados observados (Tabela 1). A melhoria também foi observada para a estação Maceió-AL, com valor bruto de P_{méd} de 3,20 mm e observado de 4,23 mm, passando a ser de 4,26 mm após a correção de tendência pelo LS. Esta abordagem demonstrou ser eficaz para o estudo de dados de precipitação em estudos anteriores (Teutschbein & Seibert, 2012; Oliveira et al., 2017; Zhang et al., 2018; Santos et al., 2019). Observando-se o desvio padrão médio

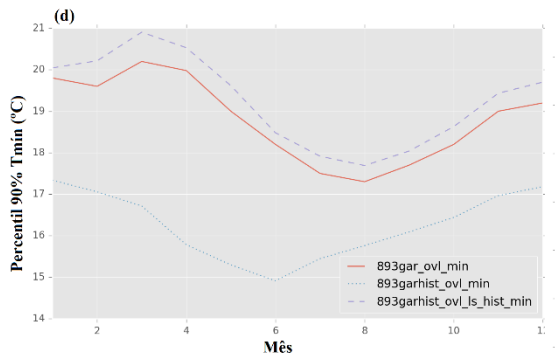
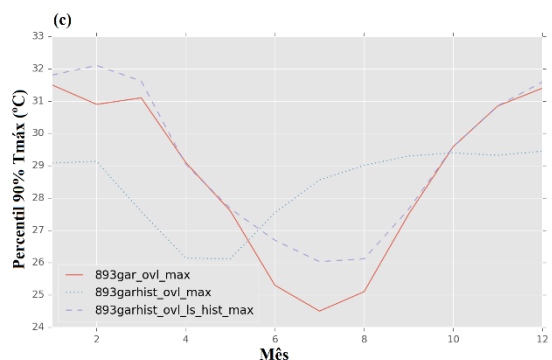
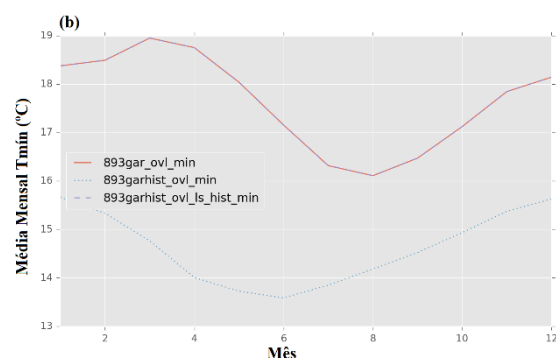
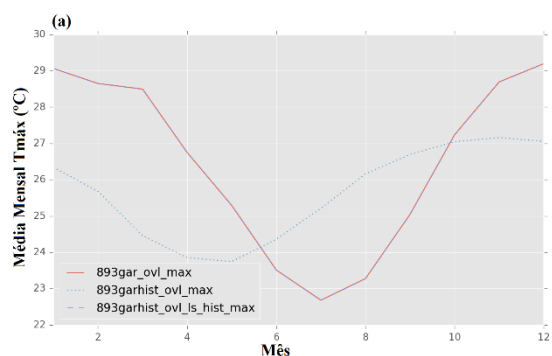
diário (Tabela 1), percebe-se que para os dados brutos, os valores estão mais próximos de zero, indicando uma certa homogeneidade dos dados. No entanto, os dados de precipitação para a região apresentam variações, especialmente no período chuvoso (junho, julho e agosto), onde ocorrem valores extremos. Tal valor médio foi melhor retratado após a correção dos dados brutos, com 2,59 mm para Garanhuns-PE (desvio médio dos dados observados igual a 2,86 mm) e 5,93 mm para Maceió-AL (desvio médio dos dados observados igual a 5,99 mm). Apesar de ter havido melhora no desvio padrão e no percentil de 90% de chuva, percebe-se que, nos meses chuvosos, as diferenças para esses parâmetros continuaram altas para a estação Garanhuns-PE (Figura 3bc). Adicionalmente, a intensidade de precipitação (mm) não foi bem corrigida pelo método LS para Garanhuns-PE, havendo superestimação das intensidades nos períodos secos (outubro a abril), conforme verificado na Figura 3d.

Os maiores valores dos fatores de correção foram encontrados para o período de maio a setembro, correspondendo aos meses de altos índices pluviométricos na bacia do Rio Mundaú. Santos et al. (2019) encontraram fatores de

correção mais altos para o período de maio a agosto, que correspondem aos meses de baixa precipitação na bacia do Rio Paraguaçu, na Bahia. De acordo com Chou et al. (2014a), os ciclos anuais de precipitação nas simulações Eta, conduzidas pelo HadGEM2-ES, produzem menos precipitação na estação chuvosa e geralmente mais na estação seca.

Para as correções de tendência pelo método LS realizadas nas 11 estações pluviométricas, foram observados valores médios de desvio padrão de 0 a 17,4 mm. Brouziyne et al. (2018), modelando estratégias de adaptação sustentável em uma bacia hidrográfica do Mediterrâneo, sob cenários projetados de mudança climática, encontraram valores de desvio padrão mais baixos para precipitação usando o método *Linear Scaling*. Para os autores, avaliar o desvio padrão durante o período do estudo oferece informações sobre a eficiência da correção de tendência e controle da incerteza.

A Figura 4 mostra a correção de tendência dos dados históricos de temperatura (1980-2005), projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, pelo método LS, para as estações Garanhuns-PE e Maceió-AL.



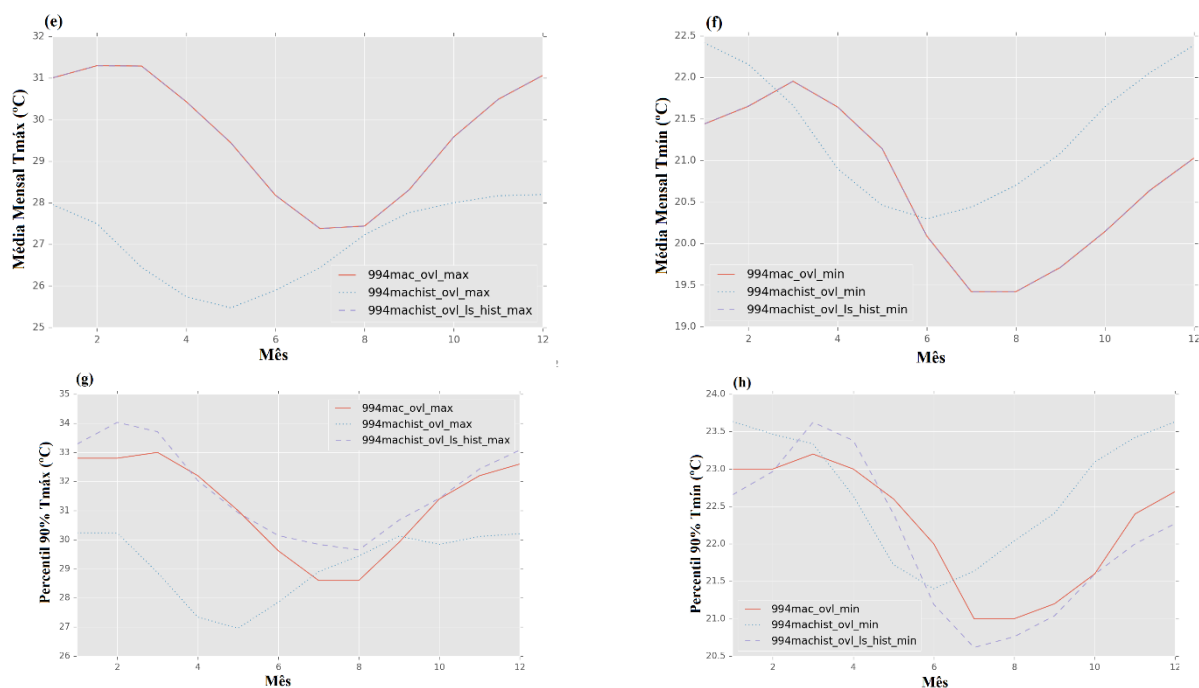


Figura 4. Correção de tendência pelo método *Linear Scaling* para as estações de temperatura em: a-d. Garanhuns-PE; e-h. Maceió-AL ($893gar_{ovl_max} / 994mac_{ovl_max}$ = dados históricos de temperatura máxima observados (1980-2005); $893gar_{ovl_min} / 994mac_{ovl_min}$ = dados históricos de temperatura mínima observados (1980-2005) $893gar_{hist_ovl_max} / 994machist_{ovl_max}$ = dados históricos de temperatura máxima brutos (1980-2005); $893gar_{hist_ovl_min} / 994machist_{ovl_min}$ = dados históricos de temperatura mínima brutos (1980-2005); $893gar_{hist_ovl_ls_hist_max} / 994machist_{ovl_ls_hist_max}$ = dados históricos de temperatura máxima corrigidos (1980-2005) pelo método *Linear Scaling*). Fonte: Farias et al. (2020).

Observando o ajuste entre as curvas na Figura 4, pode-se notar que o método LS corrigiu adequadamente os dados históricos brutos de temperatura do modelo Eta-HadGEM2-ES (1980-

2005). A Tabela 2 apresenta um resumo estatístico da média diária das temperaturas máxima e mínima de Garanhuns-PE e Maceió-AL, para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método LS.

Tabela 2. Resumo estatístico da média diária das temperaturas máxima e mínima de Garanhuns-PE e Maceió-AL para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método *Linear Scaling* (LS). Fonte: Farias et al. (2020).

Locais	Média diária das temperaturas máxima e mínima (°C)		
	Observado	Bruto	Corrigido (LS)
Estação Garanhuns-PE	26,52	25,63	26,47
	17,66	14,62	17,65
Estação Maceió-AL	29,67	27,05	29,65
	20,74	21,34	20,69

A média mensal das temperaturas (°C) máxima e mínima corrigidas pelo método LS apresentou ajuste muito bom aos dados observados, tanto para a estação Garanhuns-PE quanto para a estação Maceió-AL. Na estação Garanhuns-PE, a $T_{máx}$ bruta era de 25,63°C, e após a correção passou a ser 26,47°C, sendo este valor muito próximo a média observada (26,52°C). Para Maceió-AL, a $T_{máx}$ bruta era de 27,05°C, e após a correção passou a ser 29,65°C, sendo este valor também muito próximo a média observada (29,67°C). As melhoras em termos de aproximação também foram verificadas para as temperaturas

mínimas (Tabela 2). Observou-se que, para o percentil de 90%, houve um bom ajuste das curvas entre os dados corrigidos pelo método LS e os dados observados, quando comparados aos dados brutos (Figura 4cd, gh). A correção de tendência produziu aumento nas temperaturas médias máxima e mínima para as duas estações (Figura 4ab, ef), corroborando os resultados encontrados por Oliveira et al. (2017), ao avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre o fluxo e o potencial hidrelétrico na região de cabeceira da bacia do rio Grande, no sudeste do Brasil.

Correção de tendência dos dados do Eta-HadGEM2-ES pelo método Distribution Mapping (DM)

A Figura 5 mostra a correção de tendência dos dados históricos de precipitação (1980-2005)

projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES pelo método DM para as estações Garanhuns-PE e Maceió-AL.

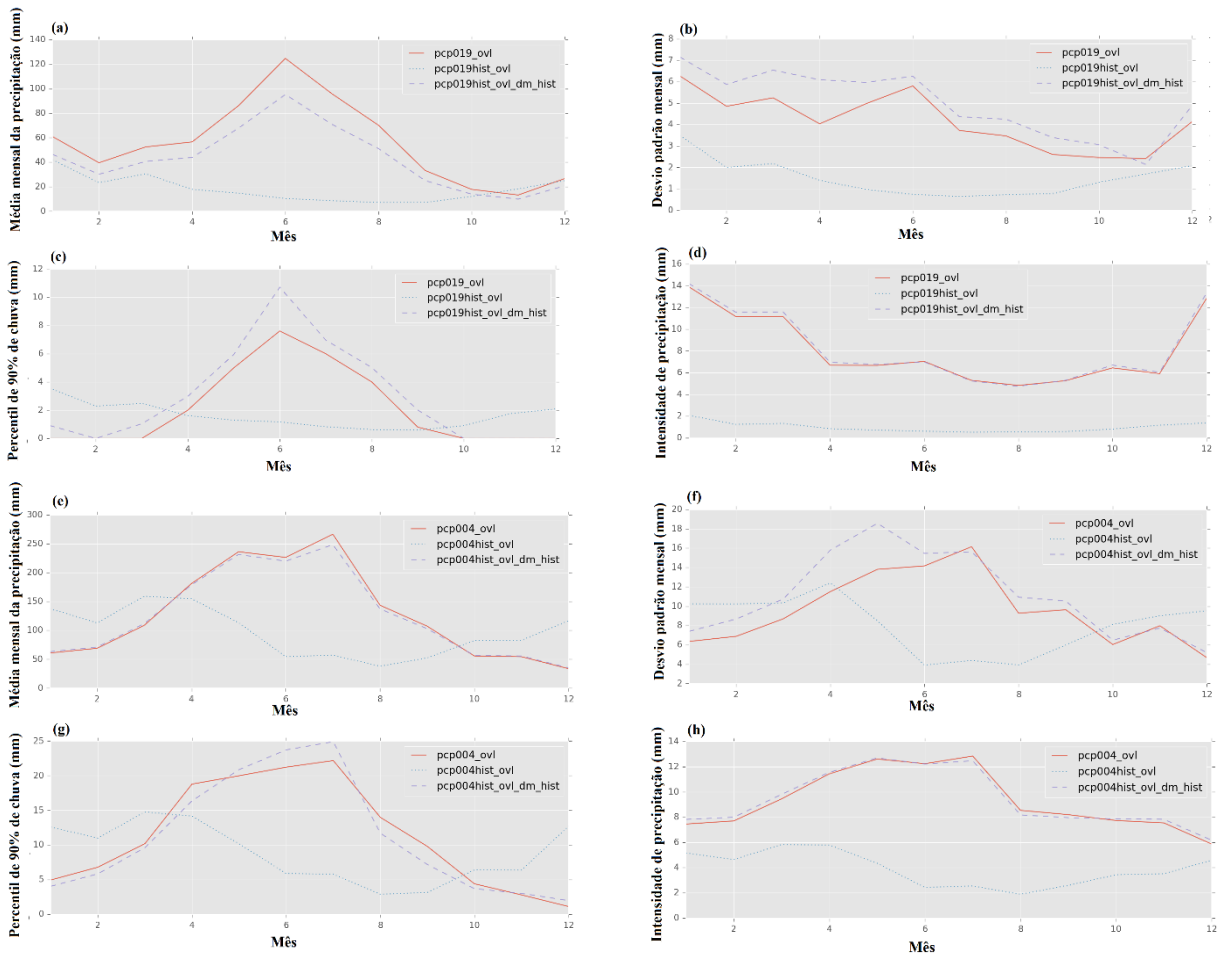


Figura 5. Correção de tendência pelo método *Distribution Mapping* para as estações de precipitação em: a-d. Garanhuns-PE; e-h. Maceió-AL (pcp019_ovl/ pcp004_ovl = dados históricos observados (1980-2005); pcp019hist_ovl/ pcp004hist_ovl = dados históricos brutos (1980-2005); pcp019hist_ovl_dm_hist/ pcp004hist_ovl_dm_hist = dados históricos corrigidos (1980-2005). Fonte: Farias et al. (2020).

Observando o ajuste entre as curvas na Figura 5, percebe-se que a correção de tendência realizada pelo método DM foi de maneira geral, melhor para as variáveis analisadas (precipitação e temperatura máxima e mínima), quando comparado com o método de correção LS (Figura

4). A Tabela 3 apresenta um resumo estatístico da média diária e da faixa de variação do desvio padrão para as estações pluviométricas de Garanhuns-PE e Maceió-AL, para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método DM.

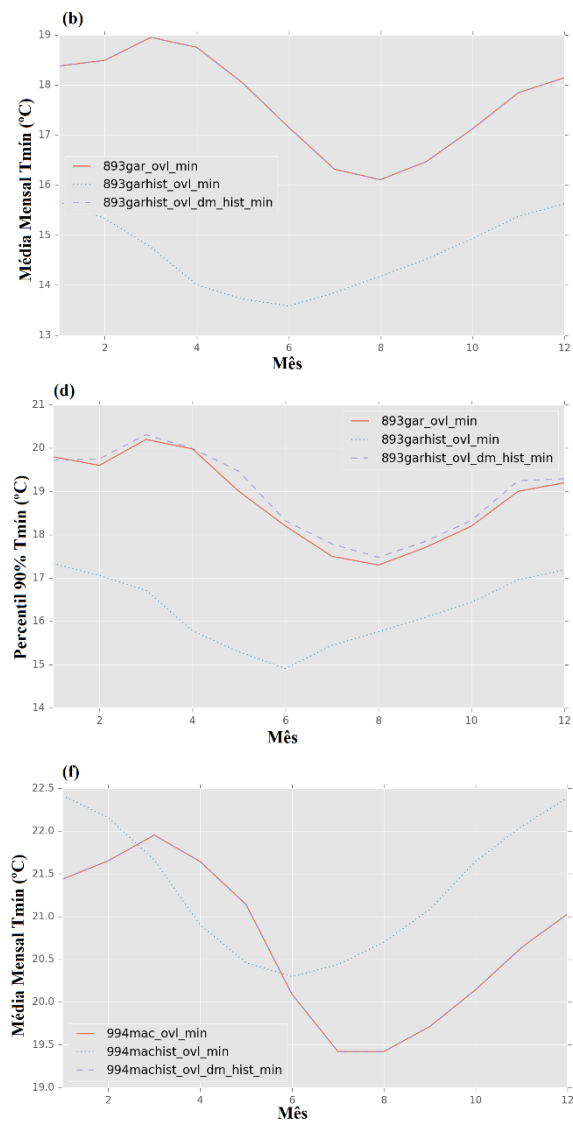
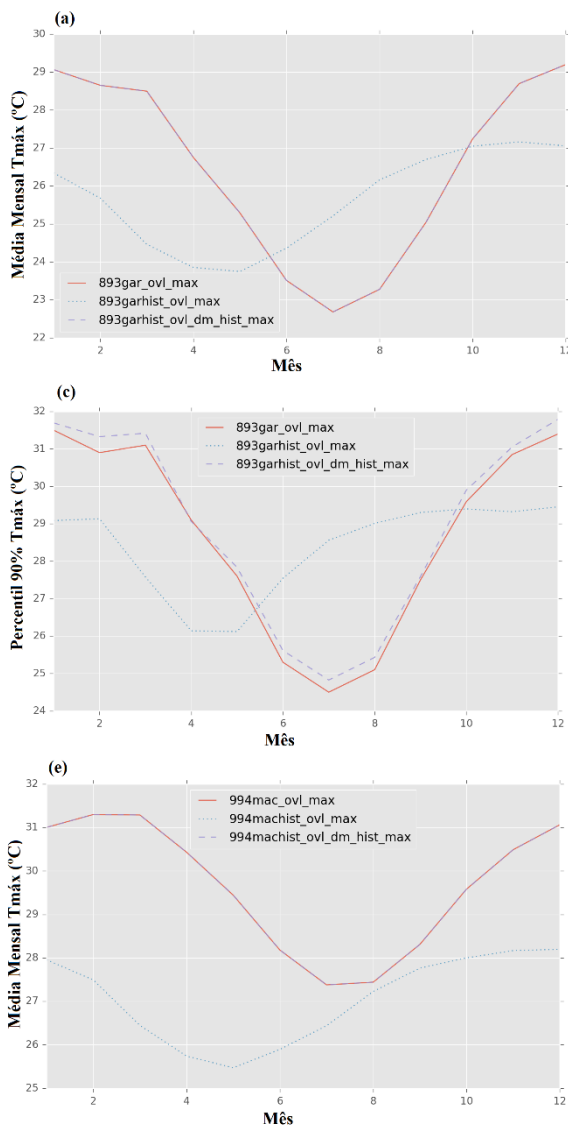
Tabela 3. Resumo estatístico da média diária e da faixa de variação do desvio padrão para as estações pluviométricas de Garanhuns-PE e Maceió-AL para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método *Distribution Mapping* (DM). Fonte: Farias et al. (2020).

Locais	Média diária das precipitações e desvios padrão (mm)		
	Observado	Bruto	Corrigido (DM)
Estação Garanhuns-PE	1,88	0,60	1,43
	2,86	0,82	2,30
Estação Maceió-AL	4,23	3,20	4,18
	5,99	4,40	6,02

A média mensal de precipitação (mm) corrigida pelo método DM resultou em bom ajuste aos dados observados, tanto para a estação Garanhuns-PE quanto para a estação Maceió-AL. Para esta variável, o método LS (Garanhuns – 1,87 mm; Maceió – 4,26 mm) foi melhor do que o DM (Garanhuns – 1,43 mm; Maceió – 4,18 mm), uma vez que se aproximou mais das médias observadas (Garanhuns – 1,88 mm; Maceió – 4,23 mm) (Tabelas 1 e 3), entretanto, o DM também foi satisfatório. A maior diferença foi verificada para as demais variáveis (desvio padrão, percentil 90% e intensidade de precipitação), para as quais o método LS não ajustou perfeitamente as curvas dos dados corrigidos aos dados observados, principalmente para a intensidade de precipitação

(Figura 3b-d, f-h). O DM corrigiu satisfatoriamente tais variáveis, com base no desvio padrão, percentil de 90% e intensidade de precipitação (Figura 5b-d, f-h). Zhang et al. (2018) verificaram que todos os métodos testados (DM, LS, *Local Intensity Scaling* e *Power Transformation*) reduziram efetivamente a discrepância entre os dados históricos simulados e observados, entretanto, não foram encontradas diferenças significativas no desempenho entre os quatro métodos.

A Figura 6 mostra a correção de tendência dos dados históricos de temperatura (1980-2005), projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES pelo método DM para as estações Garanhuns-PE e Maceió-AL.



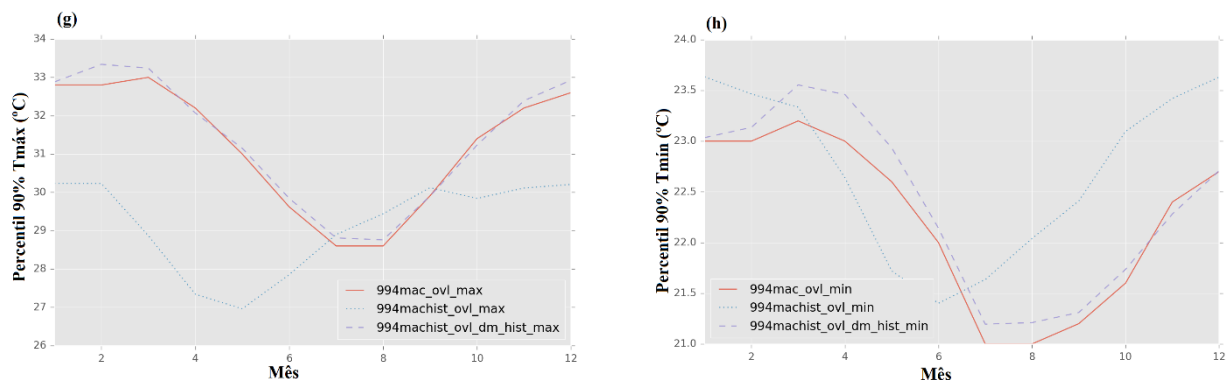


Figura 6. Correção de tendência pelo método *Distribution Mapping* para as estações de temperatura em Garanhuns-PE e Maceió-AL (893gar_ovl_max / 994mac_ovl_max = dados históricos de temperatura máxima observados (1980-2005); 893gar_ovl_min / 994mac_ovl_min = dados históricos de temperatura mínima observados (1980-2005) 893garhist_ovl_max / 994machist_ovl_max = dados históricos de temperatura máxima brutos (1980-2005); 893garhist_ovl_min / 994machist_ovl_min = dados históricos de temperatura mínima brutos (1980-2005); 893garhist_ovl_dm_hist_max / 994machist_ovl_dm_hist_max = dados históricos de temperatura máxima corrigidos (1980-2005) pelo método *Distribution Mapping*). Fonte: Farias et al. (2020).

Observando o ajuste entre as curvas na Figura 6, pode-se notar que o método DM corrigiu, adequadamente, os dados históricos brutos de temperatura do modelo Eta-HadGEM2-ES (1980-

2005). A Tabela 4 apresenta um resumo estatístico da média diária das temperaturas máxima e mínima de Garanhuns-PE e Maceió-AL, para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método DM.

Tabela 4. Resumo estatístico da média diária das temperaturas máxima e mínima de Garanhuns-PE e Maceió-AL para os dados observados, brutos e corrigidos pelo método *Distribution Mapping* (DM). Fonte: Farias et al. (2020).

Locais	Média diária das temperaturas máxima e mínima (°C)		
	Observado	Bruto	Corrigido (DM)
Estação Garanhuns-PE	26,52	25,63	26,47
	17,66	14,62	17,65
Estação Maceió-AL	29,67	27,05	29,65
	20,74	21,34	20,69

Assim como o método LS, a média mensal das temperaturas (°C) máxima e mínima corrigidas pelo método DM obteve um ajuste muito bom aos dados observados, tanto para a estação Garanhuns-PE quanto para a estação Maceió-AL. Os valores médios corrigidos pelo método DM foram os mesmos resultantes do método LS (Tabela 4). Observa-se ainda que, para o percentil de 90%, houve um ajuste das curvas ligeiramente melhor entre os dados corrigidos e observados pelo método DM (Figura 6cd, gh), quando comparado ao método LS (Figura 4cd, gh). Santos et al. (2019) encontraram que tanto o LS quanto DM foram capazes de corrigir a tendência dos dados de projeção climática dos modelos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, mas o método DM mostrou maior distorção quando aplicado aos cenários futuros. Zhang et al. (2018) verificaram que todos os métodos de correção de tendência dos dados históricos de temperatura (DM, LS e *Variance Scaling*) melhoraram significativamente o ajuste entre os dados corrigidos e observados.

Para o presente estudo, pode-se afirmar que, de maneira geral, com exceção das médias mensais de temperatura (igual para ambos os métodos) e precipitação (LS ligeiramente melhor), os dados corrigidos baseados no método DM resultaram em um melhor desempenho, quando comparado com o método LS.

Conclusão

O estudo aponta a importância da aplicação e da avaliação de diferentes métodos para correção de tendência de dados oriundos de modelos climáticos regionais. As diferenças entre os dados brutos de saída dos modelos e aqueles observados em estações de monitoramento permitiram a proposição de uma série de dados corrigidos e reforçaram a necessidade de se aplicar tais correções nas saídas dos modelos climáticos para aplicações em estudos hidrológicos. Essa correção de tendência melhora os dados climáticos brutos e aproxima-os ao comportamento dos dados observados. Considerando a Bacia do rio Mundaú,

os métodos aplicados foram capazes de corrigir a tendência dos dados de precipitação e temperatura da projeção climática do modelo regional Eta-HadGEM2-ES, sendo o método DM mais eficaz na correção quando comparado ao LS, recomendado este tipo de correção de dados visando aplicações hidrológicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe de desenvolvedores do modelo SWAT da Universidade Texas A&M (TAMU) pelo suporte técnico, à Agência Nacional de Águas (ANA), Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização do banco de dados. Este estudo foi apoiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) (Processo nº IBPG-0231-5.03 / 14, BCT-0176-5.03 / 14 e APQ-0300-5.03 / 17), CNPq (Processo nº 446254 / 2015-0 e 307641 / 2013-9), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Processo PVE aupex 2792/2013 23038007733 / 2013-76), bolsas da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (REHIDRO 1830) e PQ do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/a_presentacao.jsf. Acesso em: set. 2015.
- Andrade, C. W. L.; Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro A. A. A.; Lima, J. R. S.; Srinivasan, R.; Jones, C.A. 2018. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. *Ecology & Hydrobiology*, 19, (2), 238-251.
- Araújo, M. S.; Araújo, H. M.; Silva Júnior, C. G. 2015. Indicadores socioambientais e aplicabilidade no alto curso da bacia hidrográfica do rio Mundaú-PE. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19, (1), 1-10.
- Black, T. L. 1994. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Weather Forecasting*, 9, 265-278.
- Brouziyne, Y.; Abouabdillah, A.; Hirich, A.; Bouabid, R.; Zaaboul, R.; Benaabidate, L. 2018. Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. *Agricultural Systems*, 162, 154-163.
- Chen, J.; Brissette, F.; Lucas-Picher, P. 2016. Transferability of optimally-selected climate models in the quantification of climate change impacts on hydrology. *Climate Dynamics*, 47, 3359-3372.
- Chou, S. C.; Lyra, A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J.; Bustamante, J.; Tavares, P.; Silva, A.; Rodrigues, D.; Campos, D.; Chagas, D.; Sueiro, G.; Siqueira, G.; Marengo, J. 2014a. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3, (5), 512-525.
- Chou, S. C.; Lyra, A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J.; Bustamante, J.; Tavares, P.; Silva, A.; Rodrigues, D.; Campos, D.; Chagas, D.; Sueiro, G.; Siqueira, G.; Marengo, J. 2014b. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, 3, (5), 438-454.
- Collins, W. J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Halloran, P.; Hinton, T.; Hughes, J.; Jones, C. D.; Joshi, M.; Liddicoat, S.; Martin, G.; O'Connor, F.; Rae, J.; Senior, C.; Sitch, S.; Totterdell, I.; Wiltshire, A.; Woodward, S. 2011. Development and evaluation of an earth-system model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4, (4), 1051-1075.
- Cramér, H. 1999. *Mathematical Methods of Statistics*, ninth ed. Princeton University Press, US.
- Gomes, D. D. M.; Lima, D. R. M.; Veríssimo, C. U. V.; Duarte, C. R. 2016. Mapeamento e caracterização dos sistemas ambientais da bacia hidrográfica do Rio Mundaú - PE/AL. *Caderno de Geografia*, 26, (2), 272-299.
- Graham, L. P.; Andréasson, J.; Carlsson, B. 2007. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81, 293-307.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2002. Mapa de clima do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE. 1 mapa. Escala 1:5 000 000. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/tematicos.html>. Acesso em: abr. 2016.
- IPCC. 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, Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. M.

- (eds.)). 2013. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535p.
- IPCC. Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B.; Barros, V. R.; Dokken, D. J.; Mach, K. J.; Mastrandrea, M. D.; Bilir, T. E.; Chatterjee, M.; Ebi, K. L.; Estrada, Y. O.; Genova, R. C.; Girma, B.; Kissel, E. S.; Levy, A. N.; MacCracken, S.; Mastrandrea, P. R.; White, L. L. (eds.)]. 2014. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-32.
- Lenderink, G.; Buishand, A.; Van Deursen, W. 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, (3), 1145-1159.
- Lyra, A.; Tavares, P.; Chou, S. C.; Sueiro, G.; Dereczynski, C.; Sondermann, M.; Silva, A. Marengo, J.; Giarolla, A. 2018. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, 132, 663-682.
- Marengo, J. A. 2008. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, 27, 149-176.
- Martin, G. M.; Bellouin, N.; Collins, W. J.; Culverwell, I. D.; Halloran, P. R.; Hardiman, S. C.; Hinton, T. J.; Jones, C. D.; McDonald, R. E.; McLaren, A. J.; O'Connor, F. M.; Roberts, M. J.; Rodriguez, J. M.; Woodward, S.; Best, M. J.; Brooks, M. E.; Brown, A. R.; Butchart, N.; Dearden, C.; Derbyshire, S. H.; Dharssi, I.; Doutriaux-Boucher, M.; Edwards, J. M.; Falloon, P. D.; Gedney, N.; Gray, L. J.; Hewitt, H. T.; Hobson, M.; Huddleston, M. R.; Hughes, J.; Ineson, S.; Ingram, W. J.; James, P. M.; Johns, T. C.; Johnson, C. E.; Jones, A.; Jones, C. P.; Joshi, M. M.; Keen, A. B.; Liddicoat, S.; Lock, A. P.; Maidens, A. V.; Manners, J. C.; Milton, S. F.; Rae, J. G. L.; Ridley, J. K.; Sellar, A.; Senior, C. A.; Totterdell, I. J.; Verhoef, A.; Vidale, P. L.; Wiltshire, A. 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model Climate configurations, *Geoscientific Model Development Discussion*, 4, 765-841.
- Mesinger, F. 1984. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, 44, 195-202.
- Moss, R. H.; Edmonds, J. A.; Hibbard, K. A.; Manning, M. R.; Rose, S. K.; Van Vuuren, D. P.; Carter, T. R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G. A.; Mitchell, J. F. B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S. J.; Stouffer, R. J.; Thomson, A. M.; Weyant, J. P.; Wilbanks, T. J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
- Oliveira, V. A.; Mello, C. R.; Viola, M. R.; Srinivasan, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. 2017. *International Journal of Climatology*, 37, (15), 5005-5023.
- Piani, C.; Weedon, G. P.; Best, M.; Gomes, S. M.; Viterbo, P.; Hagemann, S.; Haerter, J.O. 2009. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395, 199-215.
- Quadro, M. F. L.; Machado, L. H. R.; Calbete, S.; Batista, N. N. M.; Sampaio, G. Climatologia, precipitação e temperatura no período de 1986 a 1996. 1996. *Revista Climanalise*, Edição comemorativa de 10 anos.
- Rathjens, H.; Bieger, K.; Srinivasan, R.; Chaubey, I.; Arnold, J. G. 2016. CMhyd User Manual. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/software/cmhyd/> (acesso em junho de 2019).
- Rodrigues, B. S. (org). 2002. Atlas Geográfico Melhoramentos. São Paulo: Editora Melhoramentos.
- 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.; Araujo Junior, L. M.; 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*, 30, (4), 435-456.
- Santos, C. A. S.; Rocha, F. A.; Ramos, T. B.; Alves, L. M.; Mateus, M.; Oliveira, R. P.; Neves, R. 2019. Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid watershed in Brazil. *Water*, 11, (170).
- Sennikovs, J.; Bethers, U. 2009. Statistical downscaling method of regional climate model results for hydrological modelling.

- 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia.
- Teutschbein, C.; Seibert, J. 2010. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies. *Geography Compass*, 4, (7), 834-860.
- Teutschbein, C.; 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*, 456-457, 12-29.
- Thom, H.C.S. 1958. A note on the gamma distribution. *Mon. Weather Rev.*, 86, (4), 117-122.
- Vaghefi, S. A.; Abbaspour, N.; Kamali, B.; Abbaspour, K. C. 2017. A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions e Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling & Software*, 96, 181-198.
- Zhang, B.; Shrestha, N. K.; Daggupati, P.; Rudra, R.; Shukla, R.; Kaur, B.; Hou, J. 2018. Quantifying the impacts of climate change on streamflow dynamics of two major rivers of the Northern Lake Erie Basin in Canada. *Sustainability*, 10, 2897.
- Zhang, D.; Chen, X.; Yao, H.; Lin, B. 2015. Improved calibration scheme of SWAT by separating wet and dry seasons. *Ecological Modelling*, 301, 54-61.