








Artigo

Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de *Downscaling* Estatístico

Rafaela Lisboa Costa¹ , Heliofábio Barros Gomes¹ , Fabrício Daniel dos Santos Silva¹ ,
Gustavo Macedo de Mello Baptista² , Rodrigo Lins da Rocha Júnior¹ ,
Dirceu Luís Herdies³ , Vicente de Paulo Rodrigues da Silva⁴ 

¹*Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil.*

²*Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.*

³*Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil*

⁴*Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.*

Recebido em: 25 de Junho de 2020 - Aceito em: 22 de Agosto de 2020

Resumo

O impacto das mudanças climáticas nos padrões de precipitação e temperaturas máximas e mínimas da região Nordeste do Brasil é investigado com base na média dos resultados de quatro modelos climáticos globais, ECHAM5-OM da Alemanha, HADGEM2-ES do Reino Unido, BCM2 da Noruega e o CNRM-CM3 da França, para dois cenários de emissões de gases de efeito estufa, A1B e A2 que tiveram suas projeções futuras regionalizadas para o período 2021-2080 com o emprego da técnica de *downscaling* estatístico. A habilidade dos modelos em simular as condições do clima presente foi validada para o período de controle 1961-1990, apresentando resultados muito satisfatórios. Foi empregado o método dos análogos para realizar o *downscaling* estatístico e encontrar as relações preditor-preditando. Os resultados apontam para uma redução expressiva da precipitação nos respectivos períodos chuvosos das sub-regiões do Nordeste, e aumento das temperaturas máximas no primeiro semestre de forma mais significativa, com tendência a diminuição em extensas áreas do setor norte do Nordeste em meses do segundo semestre, principalmente para o cenário A2. Para as temperaturas mínimas os resultados apontam para tendência de aumento em todo o ano com destaque para os meses de inverno.

Palavras-chave: *downscaling* estatístico, mudanças climáticas, precipitação, temperatura, Nordeste do Brasil.

Climate Change Scenarios for the Northeast Region of Brazil through the Statistical Downscaling Technique

Abstract

The impact of climate change on precipitation and maximum and minimum temperatures patterns in the Northeast region of Brazil is investigated based on the mean results of four global climate models, ECHAM5-OM from Germany, HADGEM2-ES from the UK, BCM2 from Norway and the CNRM-CM3 of France, for two scenarios of greenhouse gas emissions, A1B and A2, that had their future projections regionalized for the period 2021-2080 using the statistical downscaling model. The ability of the models to simulate present climate conditions was checked for the 1961-1990 control period, presenting very satisfactory results, and validated for the period 1991-2000. The analogues method was employed to perform statistical downscaling and to find predictor-predicting relationships. The results point to a significant reduction in rainfall in the respective rainy periods of the northeastern subregions, and the highest temperatures increase in the first semester, with a tendency to decrease in large areas of the northern Northeast sector in the second semester, mainly for scenario A2. For the minimum temperatures the results show a tendency of increase in all the year with highlight for the winter months.

Keywords: statistical downscaling, climatic changes, rainfall, temperature, Northeast Brazil.

1. Introdução

O ser humano sempre percebeu a influência do clima em sua rotina, regulando colheitas, interferindo nas condições de conforto ambiental e na saúde. A necessidade de se conhecer o comportamento médio das condições de tempo atmosférico impulsionou estudos climatológicos (diagnósticos e prognósticos), além de incentivar também o avanço de modelos que pudessem atender não somente a previsão de tempo, como também de clima (Ward e Foland, 1991; Hastenrah e Greischar, 1993; Xavier *et al.*, 2000, Lucio *et al.*, 2010).

Modelos Climáticos Globais (MCGs) são utilizados em todo o mundo com intuito de resolver os processos físicos da atmosfera usando parametrizações matemáticas avançadas que permitam caracterizar os principais sistemas meteorológicos de grande escala que determinam o clima global. No entanto, tais modelos, por abranger todo o planeta, possuem baixa resolução espacial, dividindo o globo em quadrículas, ou pontos de grade, da ordem de 250km ou superior (Huntingford e Cox, 2000; Xu *et al.*, 2005; Huntingford *et al.*, 2013). Tal resolução impede que se detecte toda a variabilidade climática sobre áreas que se situam, principalmente, na região tropical, como a região Nordeste do Brasil (Moura e Shukla, 1981; Mechoso *et al.*, 1990; Gates, 1999; Cavalcanti *et al.*, 2002; Teixeira *et al.*, 2002).

O clima possui uma variabilidade natural (Molion e Lucio, 2013), no entanto, estudos compilados pela equipe do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (em inglês, Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), tem reforçado que a adição de gases de efeito estufa na atmosfera tem se tornado uma importante forçante climática (IPCC, 2013).

Diante de tal situação, os MCGs passaram a ser utilizados, também, para simular o clima futuro, em um horizonte que alcança o final do século XXI, no ano de 2100. Em tais modelos são incorporadas todas as taxas de gases de efeito estufa adicionadas recentemente na atmosfera, caracterizando o chamado período de controle, cujas simulações do estado atual do clima permitem a comparação com as condições de superfície observadas no que diz respeito, por exemplo, a temperatura e taxas de precipitação observadas. Após essa etapa de calibração e validação dos MCGs quanto a sua sensibilidade às forçantes climáticas, esses são usados para simular o horizonte futuro, dessa vez com a adição de taxas esperadas de gases que serão depositados na atmosfera por meio de diferentes cenários climáticos futuros de emissões de CO₂ relativos as atividades humanas.

O princípio geral do *downscaling* é relacionar variáveis preditivas em grande escala (normalmente campos atmosféricos de larga escala, tais como a altura geopotencial no nível de 500 mb) com variáveis climáticas em uma escala de subgrade, ou em nível de estação. De acordo

com Prudhomme *et al.* (2002), o método de *downscaling* estatístico é usado principalmente devido à sua simplicidade e menos tempo computacional em comparação com o *downscaling* dinâmico.

O objetivo deste estudo é gerar cenários climáticos futuros de precipitação e temperaturas, regionalizados para o Nordeste do Brasil, utilizando-se para isso uma metodologia moderna, o *downscaling* estatístico, cuja principal vantagem é permitir adaptar a baixa resolução (em geral, de aproximadamente 250 km) dos cenários de mudanças climáticas globais, fornecidos pelos MCGs, à escala local ao nível das estações meteorológicas de superfície (Wilby *et al.*, 2002; Wilby *et al.*, 2004a,b; Wilby e Fowler, 2010).

A técnica de *downscaling* estatístico será aplicada em previsões de quatro MCGs, para dois cenários futuros de emissão de CO₂: cenários A1B e A2 (Special Report Emissions Scenarios (SRES), do IPCC (Nakicenovic *et al.*, 2000). O conjunto de informações que gerou esses cenários, cobre uma vasta gama das principais forçantes demográficas, econômicas e tecnológicas de condução das futuras emissões de gases de efeito estufa. As projeções futuras foram realizadas e analisadas para o período 2021-2080.

2. Materiais e Métodos

2.1. Dados e área de estudo

O conjunto de dados utilizado neste estudo pode ser dividido em três grupos principais: dados observados de precipitação pluviométrica (PRCP) e temperaturas máximas (TX) e mínimas (TN), provenientes de 97 estações meteorológicas localizadas na região Nordeste do Brasil; dados de reanálises climáticas para calibração do método de *downscaling* estatístico; e dados em grande escala de quatro MCGs, para diferentes níveis atmosféricos, que serão melhor descritos a seguir.

Os dados de reanálises utilizados são do projeto ERA40 (Uppala *et al.*, 2005) e do NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996; Brands *et al.*, 2012), disponíveis em uma grade comum de 2,5° x 2,5°, mesma resolução de grade dos quatro MCGs, tanto para o período de controle (1961-1990) quanto para cenários futuros (A1B e A2, para 2021-2080).

O método de *downscaling* estatístico foi validado para o período 1991-2000. Já os cenários futuros de 2021 a 2080, devido a sua extensão temporal, serão comparados a uma climatologia mais abrangente, obtida para um período de observações de 1961 a 2014.

2.2. Modelos Climáticos Globais (MCGs) e cenários climáticos

Os MCGs utilizados nesta pesquisa para a geração dos cenários de mudanças climáticas de precipitação, tem-

peraturas máximas e mínimas para o período 2021-2080 foram o ECHAM5-OM, do *Max Planck Institute for Meteorology*, da Alemanha (Marsland *et al.*, 2003; Radatz *et al.*, 2007); o HadGEM2-ES, do *Meteorological Office Hadley Centre*, do Reino Unido (Bellouin *et al.*, 2007; Collins *et al.*, 2008); o BCM versão 2, do *Bjerknes Centre for Climate Research* (BCCR), da Universidade de Bergen, Noruega (Furevik *et al.*, 2003; Randall *et al.*, 2007); e o CNRM-CM3 do *Centre National de Recherches Météorologiques* da França (Douville *et al.*, 2002; Salas-Meliá, 2002).

Os cenários trabalhados nesta pesquisa, A1B e A2, são derivados da família A de cenários. O cenário A1B representa um futuro de rápido crescimento econômico em que haverá um equilíbrio alcançado pela população mundial entre o consumo de combustíveis fósseis e não fósseis (SRES, 2010). O cenário A2 retrata um mundo mais heterogêneo, com um consumo ainda predominante de combustíveis fósseis, com altos índices de crescimento populacional e menor crescimento econômico (SRES, 2010). O cenário A1B é considerado um cenário realista, e o A2 é considerado pessimista. Muitos autores consideram que estes cenários são consistentes com a tendência mundial de consumo de combustíveis fósseis. Logo, são representações confiáveis de como se comportará o clima global futuramente (Jones *et al.*, 2004).

2.3. Downscaling estatístico

A técnica de *downscaling* estatístico permite adaptar a baixa resolução dos cenários de mudanças climáticas globais fornecidas pelos MCGs para escala regional ou local. Esses métodos ligam as saídas em larga escala dos MCGs com observações históricas locais de variáveis de superfície como a precipitação ou temperatura na região de interesse (Timbal *et al.*, 2003; Hewitson e Crane, 2006; Timbal e Jones, 2008; Benestad, 2010; Maraun *et al.*, 2010; Brands *et al.*, 2011a; Brands *et al.*, 2011b; Gutzler e Robbins, 2011).

Qualquer método de *downscaling* estatístico, inicialmente, relaciona dados de reanálises, que representam uma análise gradeada proveniente de interpolação de observações e análises de modelos sob a mesma resolução espacial do MCG, com as previsões das variáveis de grande escala dos MCGs. Dessa forma estabelece-se a relação preditor/preditando, para um período representativo de ao menos 30 anos. Um modelo de *downscaling* estatístico (MDE) proveniente dessa relação pode então ser aplicado aos dados de superfície (Wilby e Dawson, 2013).

São muitas as técnicas disponíveis para aplicação de um *downscaling* estatístico (Harpham e Wilby, 2005; Dibike e Coulibaly, 2005; Khan *et al.*, 2006; Wilby e Harris, 2006; Toews e Allen 2009). A forma mais comum de obter a relação estatística ou empírica a partir da relação quantitativa entre preditores e predictandos, pode ser enten-

dida como: $R = F(L)$, onde R representaria o predictando (a variável climática regional, ou local, por exemplo, precipitação e temperatura obtida de uma determinada estação meteorológica), e F uma função de transferência determinística/estocástica condicionada por L , obtida a partir da relação empírica obtida da respectiva grade associada ao MCG utilizado. Os MDEs combinam as informações dos MCGs as reanálises das observações das variáveis de grande escala, a fim de inferir os modelos de transferência estatística apropriados. Portanto, dois ingredientes básicos dos MDEs são os conjuntos de dados de reanálises e as observações, que são necessários para definir e calibrar o/ os MDE(s) que será(ão) usados posteriormente para gerar cenários futuros.

Uma vez que a cadeia Preditores → Predictandos → Método de redução de escala tenha sido concluída, os MDEs estarão prontos para ser utilizados e aplicados a qualquer um dos MCGs disponíveis. Para a elaboração dos resultados de *downscaling* estatístico das variáveis precipitação, temperaturas máximas e mínimas desta pesquisa, foram utilizadas as funcionalidades fornecidas pelo *ENSEMBLES Downscaling Portal*, desenvolvido pelo *Grupo Santander Meteorologia* (<http://www.meteo.uni-can.es>) com a assistência técnica do *Predictia* (<http://www.predictia.es>) como parte das atividades do projeto *ENSEMBLES* financiado pela União Europeia (Cofiño *et al.* 2007).

A redução de escala com o MDE consiste em quatro etapas principais: (1) seleção de preditores, (2) calibração de funções de transferência, (3) validação dos resultados do modelo de redução de escala, e (4) geração de cenários (Wilby e Fowler, 2010), descritas a seguir.

2.3.1 Seleção dos preditores

Para a calibração do modelo, é preciso escolher um período com o maior número possível de dados observados. Neste trabalho trabalhou-se com o período de calibração e validação sugerido por Carter *et al.* (2007), 1961-1990, período clássico da última climatologia oficial da Organização Meteorológica Mundial. Desta forma, não se torna uma tarefa complexa obter uma boa relação preditor-predictando (Coulibaly *et al.*, 2005). Os dados de reanálises do projeto ERA40 foram usados para calibração da precipitação e do NCEP/NCAR para as temperaturas máximas e mínimas, em uma grade comum $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ para o período de controle 1961-1990 (Flato *et al.*, 2013; Collins *et al.*, 2013; Hartmann *et al.*, 2013). Para a variável precipitação, a Fig. 1 mostra a grade utilizada projetada sobre a região Nordeste, com as respectivas variáveis predictoras: componentes meridional e zonal da velocidade média do vento no nível de 850 hPa, umidade específica no nível de 850 hPa, pressão ao nível médio do mar, geopotencial em 500 hPa e temperatura no nível de 850 hPa. Para as temperaturas máximas e mínimas, foram selecionadas as respectivas variáveis predictoras: umidade específica no nível

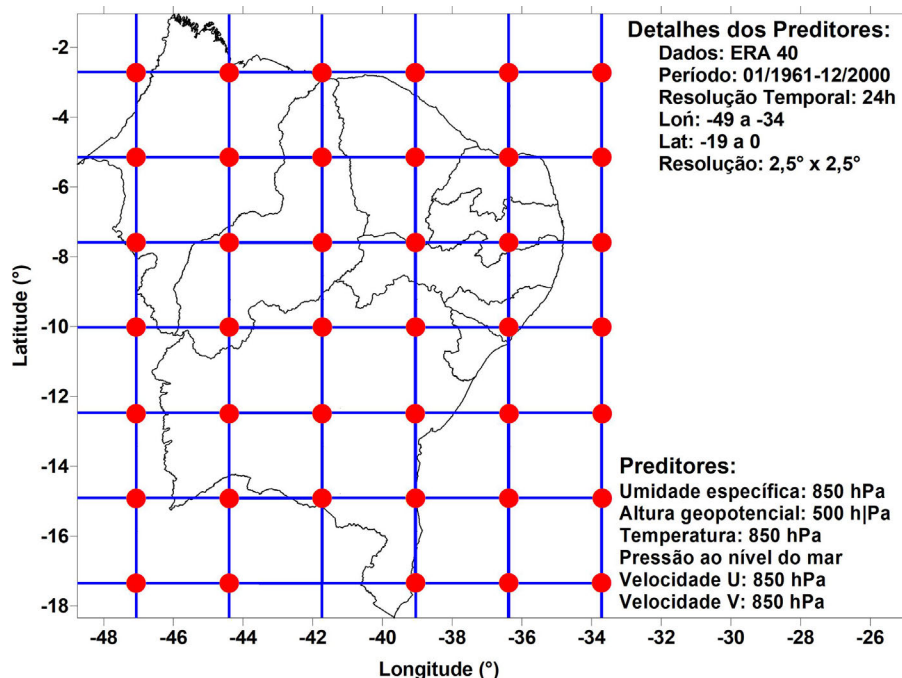


Figura 1 - Grade e preditores utilizados para a precipitação da região Nordeste.

de 850 hPa, pressão ao nível médio do mar, geopotencial em 500 hPa e temperatura no nível de 850 hPa.

A Tabela 1 mostra as variáveis de grande escala disponíveis, tanto do projeto ERA40 quanto do NCEP/NCAR, para seleção dos preditandos, que devem coincidir com variáveis simuladas pelos MCGs (Wilby e Wigley, 2000; Fowler *et al.*, 2007; Teutschbein *et al.*, 2011).

2.3.2 Seleção dos preditandos

Foram processados dados observados de PRCP, TX e TN de 97 estações meteorológicas pertencentes ao INMET na região Nordeste do Brasil. Essas três variáveis são os preditandos, as quais devem passar pelo processo de calibração com os preditores que foram selecionados a partir dos dados de reanálises, de forma independente

Tabela 1 - Descrição das variáveis, níveis de altura e unidades do conjunto de parâmetros disponíveis para seleção de preditores.

Variável (código)	Níveis atmosféricos (hPa)	Unidades
Geopotencial (Z)	1000, 850, 700, 500, 300	$m^2 s^{-2}$
Componente Meridional do Vento (V)	850, 700, 500, 300	$m s^{-1}$
Componente Zonal do Vento (U)	850, 700, 500, 300	$m s^{-1}$
Temperatura (T)	850, 700, 500, 300	K
Umidade Específica (q)	850, 700, 500, 300	$kg kg^{-1}$
Pressão ao Nível do Mar (PNM)	Superfície	Pa
Temperatura a 2 m (2T)	Superfície	K

entre si. A Fig. 2 mostra a localização espacial das estações, as quais podem ser analisadas individualmente ou em grupos para, em seguida, ser escolhido o MDE, o respectivo MCG e o respectivo cenário a ser trabalhado na geração das séries futuras de PRCP, TX e TN.

2.3.3 Seleção do método de Downscaling estatístico

Para geração dos cenários de mudanças climáticas, foi empregado o método dos análogos. Esse MDE é baseado em vizinhos próximos ou em uma pré-classificação da reanálise em um número finito de tipos de tempo obtidos de acordo com sua semelhança sinótica, onde um algoritmo de previsão é obtido para a geração das séries temporais (Gutiérrez *et al.*, 2013).

Esse método tem sido aplicado essencialmente no campo da previsão do tempo (Lorenz, 1969; Kruizinga e Murphy, 1983), e na previsão do clima a curto prazo (Barnett e Preisendorfer, 1978; Van Den Dool, 1994). Para fins de redução de escala, esse método ainda é pouco aplicado (Zorita *et al.*, 1995; Cubasch *et al.*, 1996; Biau *et al.*, 1999; Zorita e Storch, 1999), embora a sua metodologia seja simples. A circulação atmosférica em grande escala simulada por um MCG é comparada com cada uma das observações históricas, e o padrão mais semelhante com as observações é escolhido como seu análogo. O clima local observado simultaneamente é, então, associado ao padrão de grande escala simulado.

Nesse método, os padrões análogos são filtrados por funções ortogonais empíricas (FOE), especificando um estado local coerente com um estado simultâneo de grande

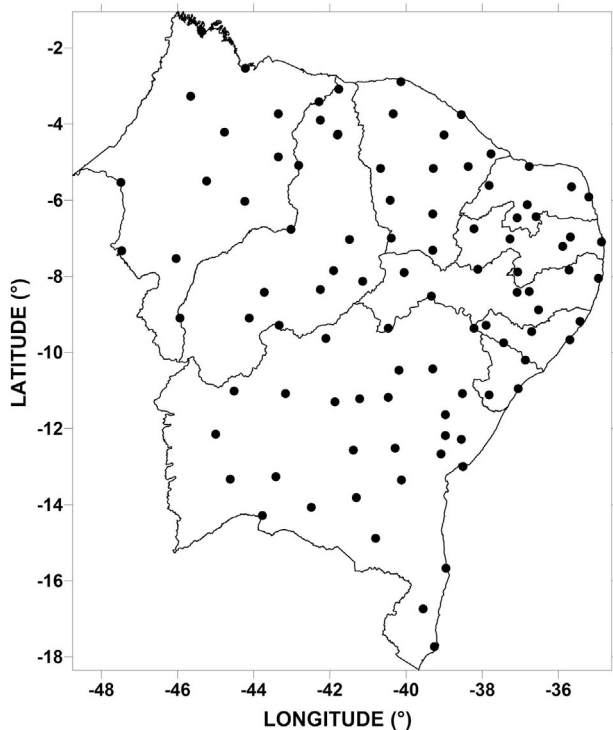


Figura 2 - Distribuição espacial das estações na região Nordeste para escolha de um preditor (PRCP, TX e TN) para um determinado experimento.

escala. Como exemplo, as anomalias da circulação atmosférica, por exemplo, representadas por (f) do campo da Pressão ao Nível do Mar (PNM), são descritos por poucos padrões principais de FOE (Eq. (1)):

$$f(i, t) = \sum_{k=1}^n xk_t gk_i + \varepsilon_t \quad (1)$$

onde i é um índice de ponto de grade, t é o tempo, gk é o padrão de ordem k da FOE, $xk(t)$ é a amplitude deste padrão no tempo t , n representa o número de padrões de FOE retidos, e ε é a parte da variabilidade não descrita pelos principais padrões n , considerado pequeno. Os análogos são pesquisados apenas dentro do espaço gerado por estas n FOE padrões.

A validação é feita tanto em nível diário, quanto decenal e mensal. Principalmente no caso da precipitação, uma variável de caráter duplo, discreta/continua, melhores desempenhos normalmente serão observados para maiores intervalos de acumulação. As climatologias do período 1961-1990 são comparadas para verificar a habilidade dos modelos em simular os ciclos anuais. Para fins de validação, o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre simulações e observações foi calculado. O teste de significância estatística t -student foi empregado para obter o valor crítico de correlação (r_c) que é um valor para o qual se aceita ou não a hipótese estatística que existe correlação

entre os dados simulados e observados, a um nível de confiança estatística de no mínimo 95%. r_c é dado por:

$$r_c = \sqrt{\frac{t^2}{(N-2) + t^2}} \quad (2)$$

3. Resultados e Discussão

Nesta seção discutiremos os resultados obtidos no processo de calibração e validação do MDE utilizado para a geração de cenários futuros. Em seguida serão mostrados os mapas dos desvios das médias de precipitação e temperaturas máximas e mínimas obtidas para o período 2021-2080 em relação a médias das observações das estações no período 1961-2014, para os dois cenários a partir do ensemble dos quatro modelos analisados.

3.1. Simulação do clima presente

Um dos critérios comumente usados na avaliação de desempenho de qualquer MDE é se a condição histórica (observação) pode ser ou não replicada. Portanto torna-se indispensável que os métodos usados para transferir os resultados de MCGs para estações meteorológicas gerem séries temporais de precipitação e temperatura que tenham as mesmas propriedades dos dados meteorológicos observados, resultando em boa correlação entre ambos e que apresentem habilidade ótima em caracterizar a climatologia de um período de referência.

O IPCC recomenda 1961-1990 com o período basal climatológico na avaliação de impactos. Portanto, esse período também foi utilizado neste estudo para validar a técnica de *downscaling* estatístico empregado aos quatro modelos utilizados. A fim de apresentar as informações de forma mais sucinta, adotou-se a média mensal obtida do conjunto dos modelos, a partir das séries diárias geradas, para compor a climatologia e testar a correlação. Estudos indicam que a correlação aumenta com o intervalo de acumulação e com a média do resultado dos modelos (Silva et al., 2009), pois este resultado final diminui a variância natural entre modelos (Murphy et al., 2000), como mostra a Fig. 3. Para PRCP as correlações variaram de 0,03 a 0,38 para a comparação diária, 0,11 a 0,70 para acumulados descendais e de 0,15 a 0,77 para acumulados mensais. Para TX as correlações variaram de 0,04 a 0,63 para a comparação diária, 0,15 a 0,88 para médias descendais e de 0,18 a 0,93 para médias mensais. Para TN as correlações variaram de 0,01 a 0,62 para a comparação diária, 0,12 a 0,88 para médias descendais e de 0,25 a 0,94 para médias mensais.

Os mapas da Fig. 4 mostram a habilidade dos modelos em representar o ciclo anual da PRCP. O painel superior mostra as normais climatológicas 1961-1990 observadas e o painel central mostra o mesmo mas para a média dos modelos, e o painel inferior mostra as diferenças entre

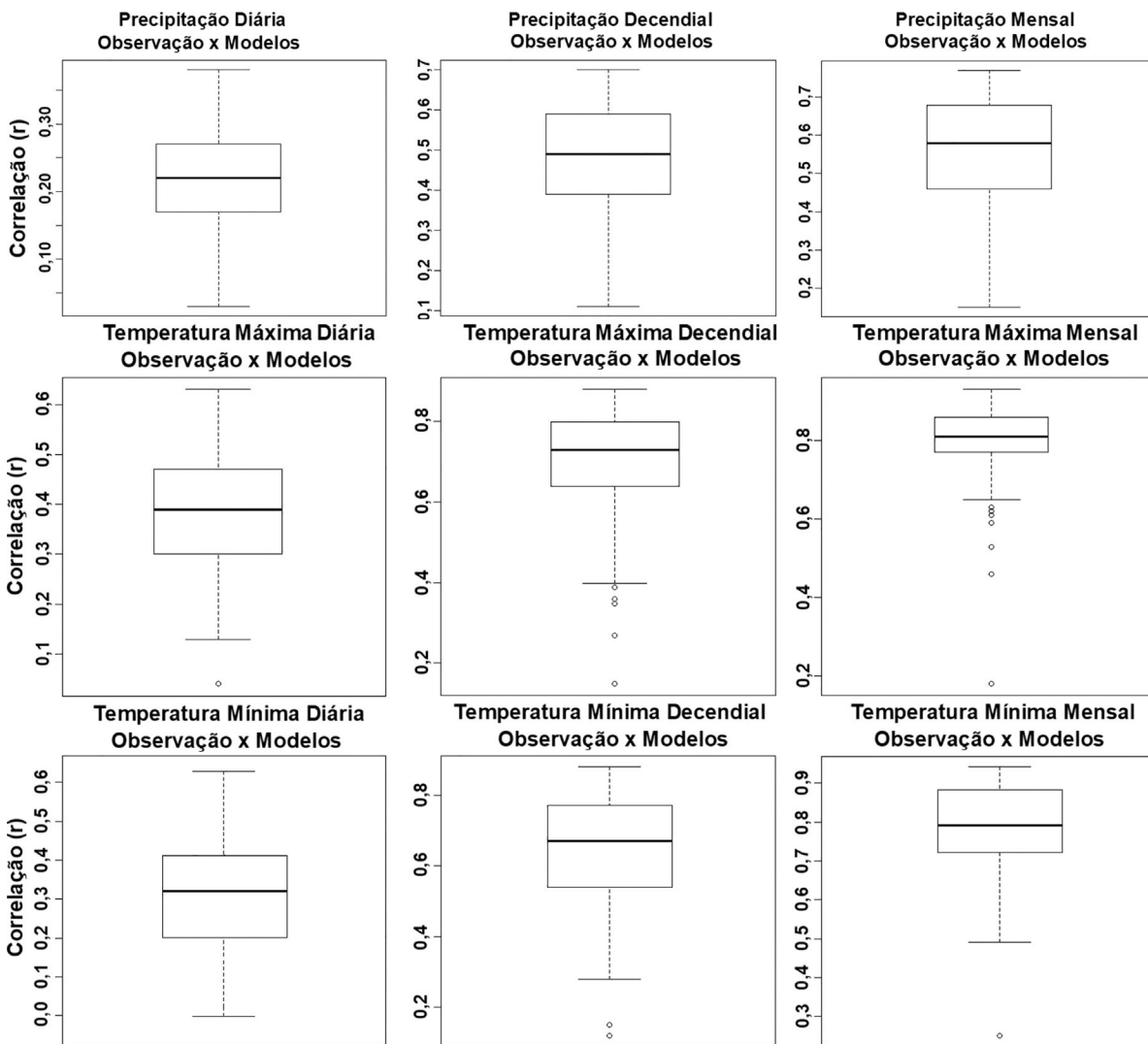


Figura 3 - Plotagens *box* e *whisker* para a correlação obtida entre dados diários observados e proveniente da média dos modelos (esquerda), decadais (meio) e mensais (direita), para precipitação (acima), temperaturas máximas (meio) e temperaturas mínimas (abaixo). As caixas denotam a mediana de 50% dos valores entre os percentis de 25 e 75%, com a linha vertical compreendida entre os valores máximos e mínimos. A escala vertical para a correlação é variável, aumentando a cada intervalo de acumulação.

as normais dos modelos e observada. Os modelos subestimaram a PRCP de janeiro a maio no norte do Nordeste principalmente nos estados do Maranhão e Piauí, com destaque maior de fevereiro a abril, quando desvios negativos se estendem para outros estados como o Ceará, e oeste dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, a partir de maio estas áreas recuam novamente para o norte do Maranhão e Piauí. A partir de junho até dezembro notam-se núcleos pouco significativos de subestimativa da PRCP em áreas litorâneas que se estendem para o interior da região. [Alves et al. \(2005\)](#) mostram que muitos MCGs subestimam a PRCP do norte do Nordeste entre fevereiro e maio por não conseguirem representar bem a Zona de Convergência Intertropical, que é o principal sistema meteorológico indutor de chuvas na faixa norte do Nordeste neste trimestre.

Para TX na [Fig. 5](#), os modelos também simulam bem o ciclo anual. O painel superior mostra as normais climatológicas 1961-1990 observadas e o painel central mostra o mesmo mas para a média dos modelos, e o painel inferior mostra as diferenças entre as normais dos modelos e observada. No entanto percebe-se maiores diferenças entre simulações e observações. Isto se dá devido a escala utilizada, com anomalias de -1 a 1 °C e intervalos de $0,2$ °C, muito sensível a pequenas variações. De janeiro a março uma grande área com desvios positivos é observada no norte do Nordeste alternada a outra com desvios negativos em parte do litoral leste e centro-sul da Bahia. De abril a julho predominam áreas com desvios positivos, enquanto de agosto a dezembro predominam desvios negativos, com exceção do sul do Maranhão e oeste da Bahia, de outubro a dezembro.

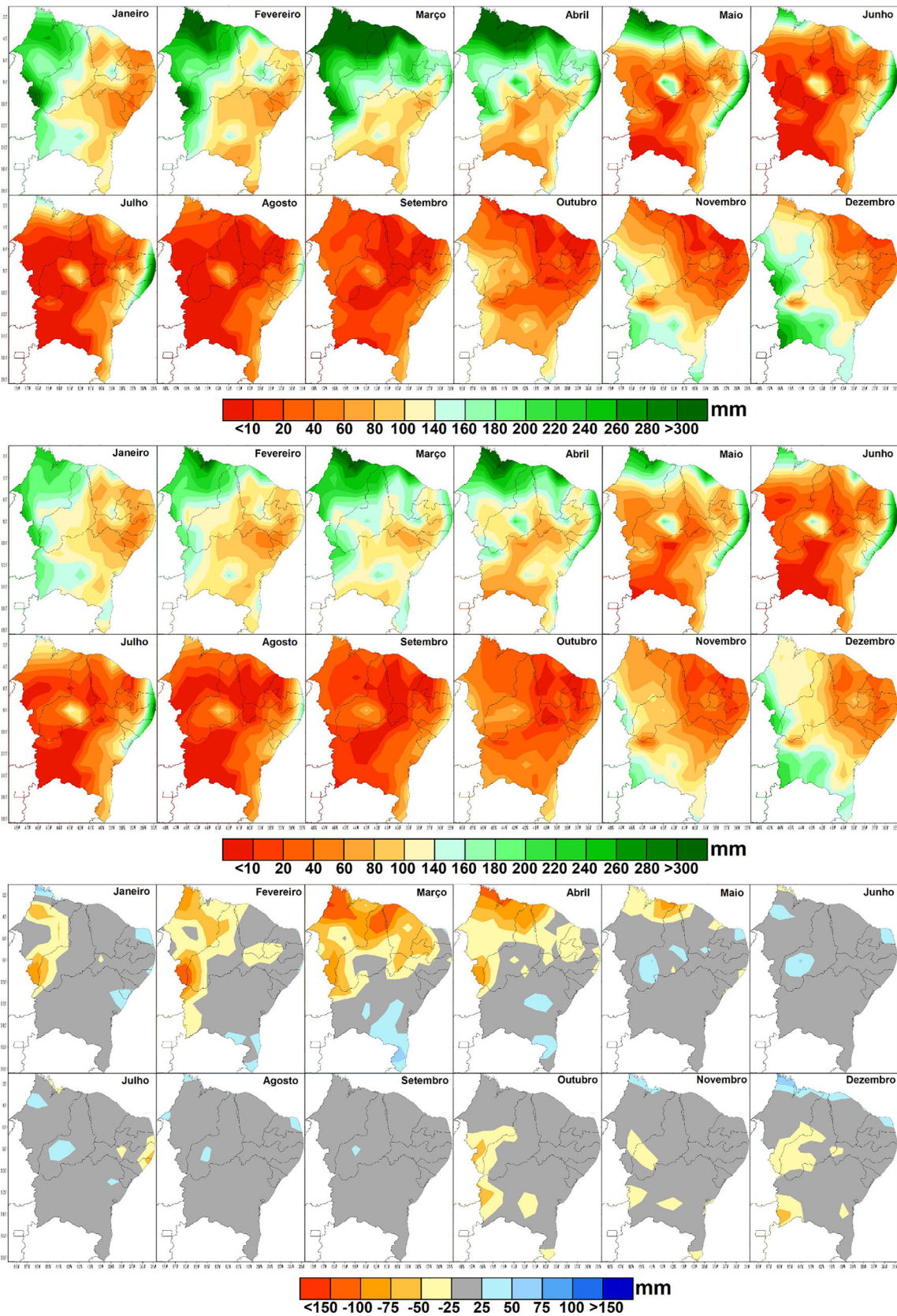


Figura 4 - Climatologias mensais da precipitação para o período 1961-1990 obtida a partir de observações (painel superior), a partir da média dos quatro modelos (painel central) e diferença entre a média dos modelos e as observações (painel inferior).

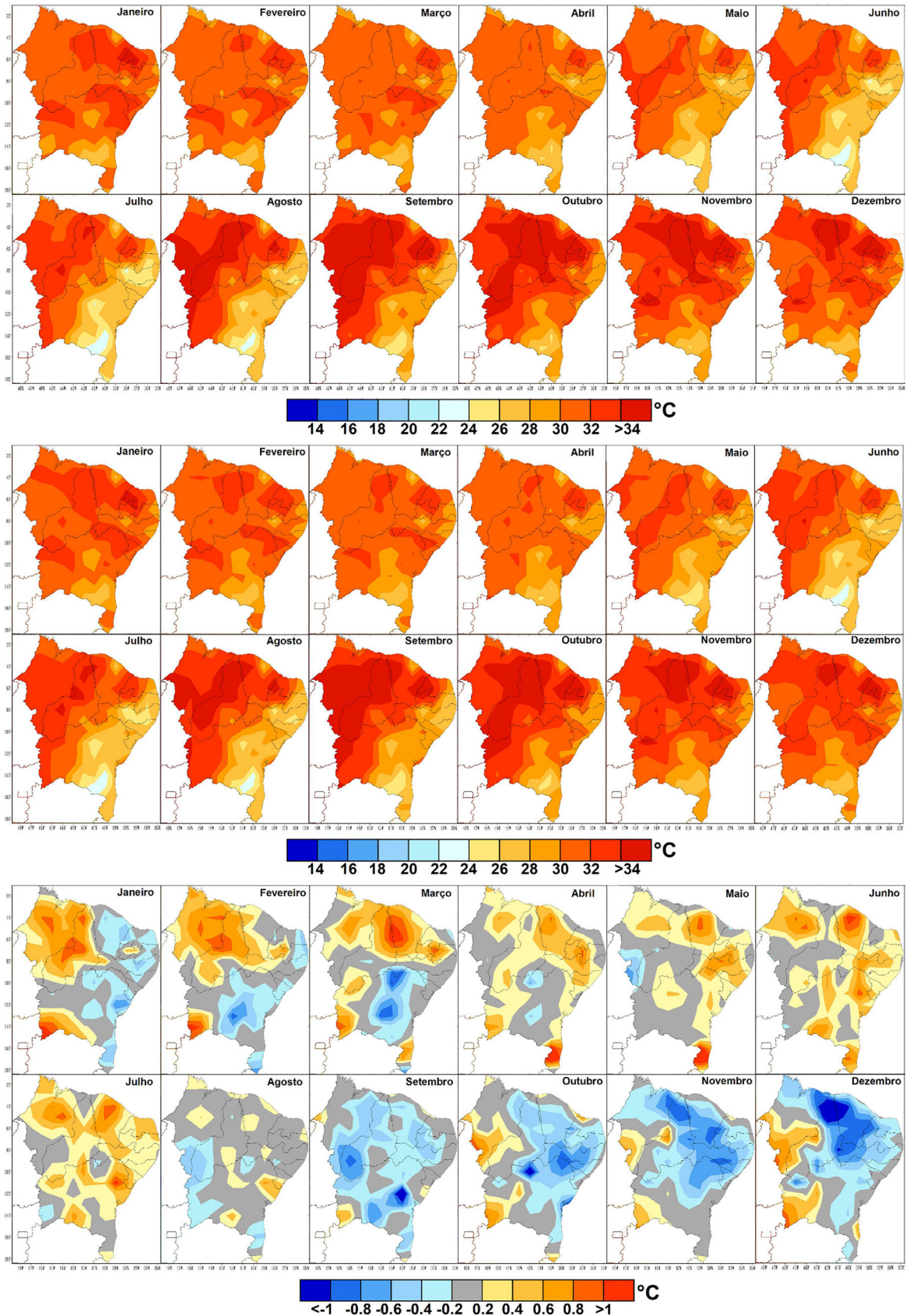


Figura 5 - Análogo a Fig. 4, exceto para temperaturas máximas.

Para TN na Fig. 6, os modelos seguem a tendência de simular muito bem o período de observações caracterizando com precisão o ciclo anual. O painel superior mos-

tra as normais climatológicas 1961-1990 observadas e o painel central mostra o mesmo mas para a média dos modelos, e o painel inferior mostra as diferenças entre as

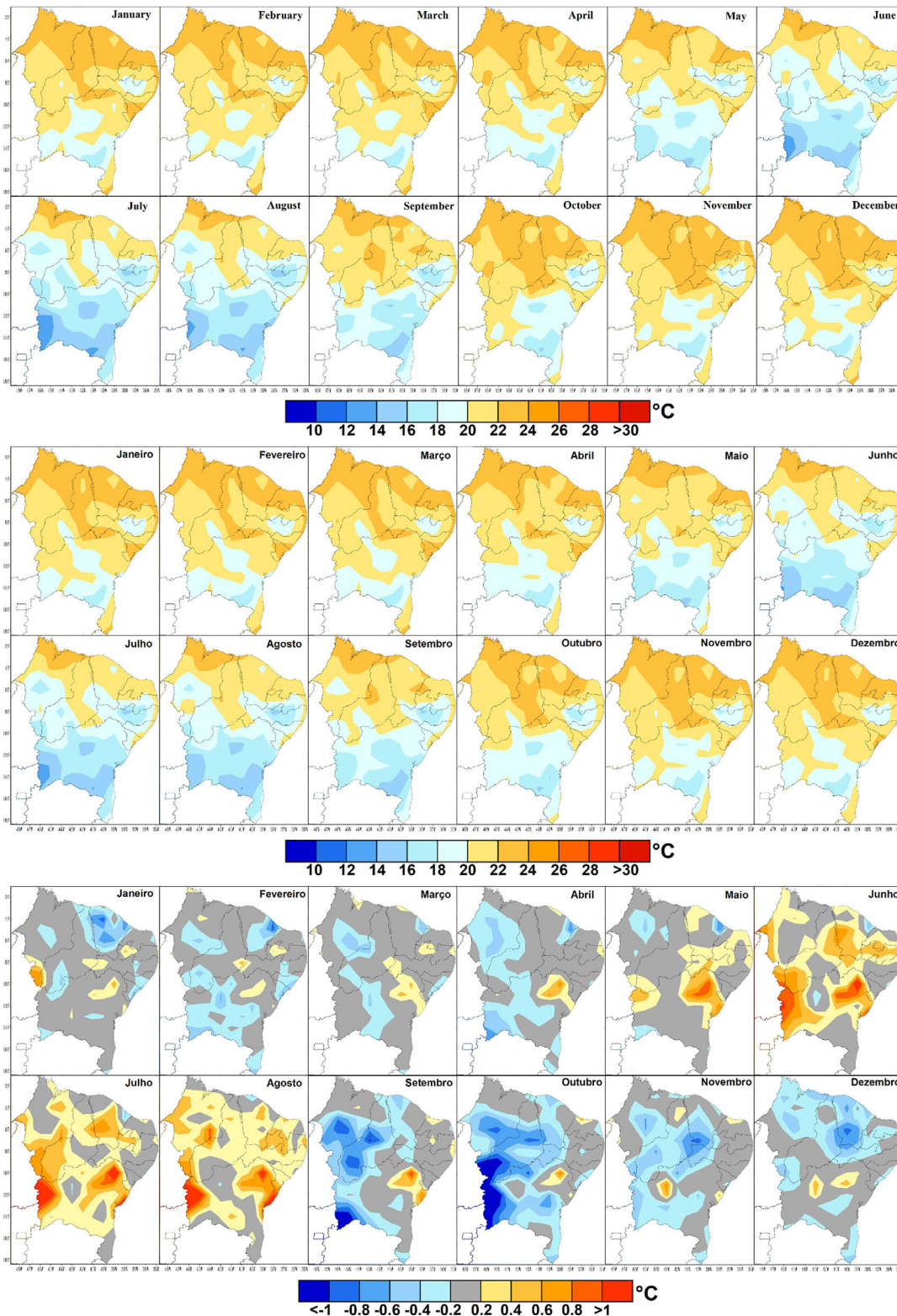


Figura 6 - Análogo a Fig. 4, exceto para temperaturas mínimas.

normais dos modelos e observada. Ao contrário da TX, no início do ano entre janeiro e abril predominam áreas com desvios negativos, com os modelos subestimando as observações em alguns décimos de graus. Esta situação se inverte a partir de maio, predominando áreas com núcleos mais intensos de desvios positivos, ou seja, superestimação dos modelos durante final do outono e inverno. Novamente nos últimos quatro meses do ano os modelos subestimam as observações, com destaque para o centro-sul do Maranhão e Piauí e oeste da Bahia, com desvios que superam $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ em setembro e outubro.

Em resumo, para as três variáveis analisadas nota-se a boa performance dos modelos em simular o clima passado quanto à precipitação e temperaturas, gerando confiança para as projeções de clima futuras. A Fig. 7 mostra a correlação entre observações e simulações para o período 1991-2000 para PRCP (esquerda), TX (centro) e TN (direita). Foi aplicado o teste *t-student* para as correlações, que mostrou haver significância estatística a um nível mínimo de 95% de confiança para todas as estações.

Para o tamanho das séries comparadas, o coeficiente de correlação crítica ao nível de 5% de significância é 0,11 e ao nível de 1% é 0,18. No caso da PRCP a correlação mínima observada foi de 0,15 e a máxima foi de 0,77. Para TX a correlação mínima observada foi de 0,18 e a máxima foi de 0,93. Para TN a correlação mínima observada foi de 0,25 e a máxima foi de 0,97.

3.2. Cenários futuros

Os cenários climáticos futuros foram desenvolvidos utilizando como MDE o método dos análogos, usando as variáveis preditoras descritas no tópico 2.3.1 para os dois cenários de emissões, A1B e A2 para o período 2021-2080 com base na média (*ensemble*) dos quatro MCGs. Descritos no tópico 2.2. No entanto, serão mostrados apenas as

diferenças entre a climatologia mensal dos modelos para o período 2021-2080 versus a climatologia observada do período 1961-1990.

3.2.1 PRCP

Para o cenário A1B (Fig. 8), a diferença entre as climatologia mensais indica redução da precipitação no norte do Nordeste entre fevereiro e maio, ultrapassando menos de 150 mm em muitas áreas nestes meses. O leste do Nordeste, que tem seu período mais chuvoso de abril a julho também apresenta redução da PRCP entre 100 e 150 mm. O sul do Maranhão e Piauí e oeste da Bahia, que tem seu período chuvoso de outubro a fevereiro, também aponta para significativa redução da PRCP principalmente no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro. Algumas áreas isoladas apresentam aumento da PRCP, não muito significativa, de junho a novembro, destacando-se o litoral do Rio Grande do Norte com projeção de aumento superando os 100 mm em dezembro, aumento que se mantém em menor intensidade em janeiro e fevereiro. Para o cenário A2 (Fig. 9), a situação é muito similar à verificada para o cenário A1B.

3.2.2 TX

O cenário A1B (Fig. 10) indica aumento significativo da TX, ultrapassando $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre janeiro e junho em todo o Nordeste. De julho a dezembro esses desvios positivos se restringem ao centro-sul e leste do Nordeste, mais intensos no centro-oeste baiano e sul do Maranhão. O setor norte do Nordeste apresenta TX próximas a média do período observado entre agosto e setembro, dando lugar a desvios negativos no trimestre de outubro a dezembro, com destaque para os dois últimos meses do ano com média de temperaturas inferiores a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ em partes do Maranhão, Piauí e Ceará.

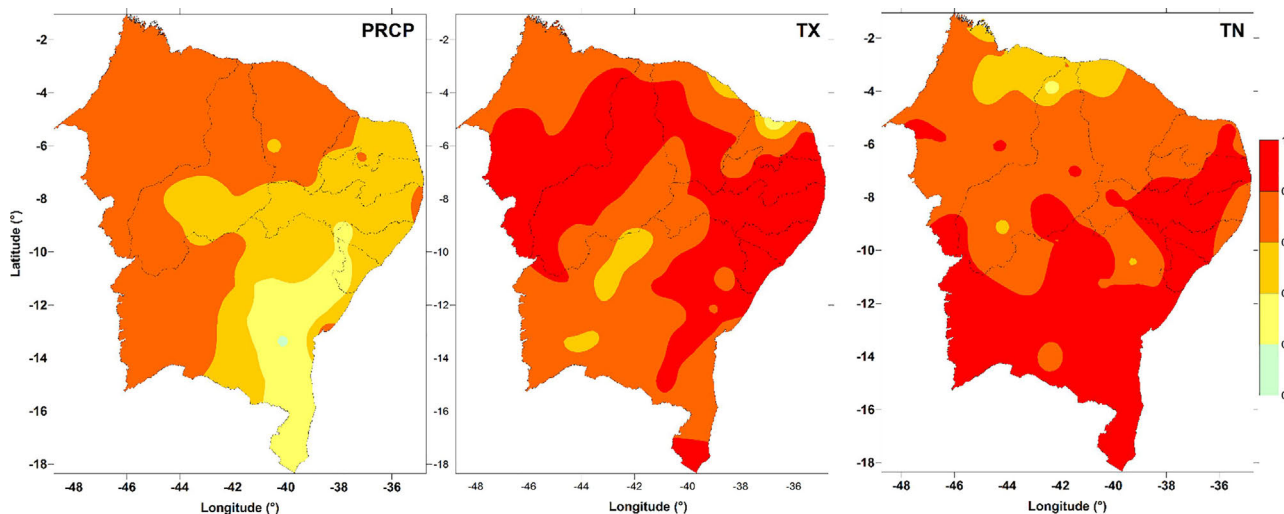


Figura 7 - Espacialização das correlações mensais entre observações e simulações a partir da média dos modelos para o período 1961-1990.

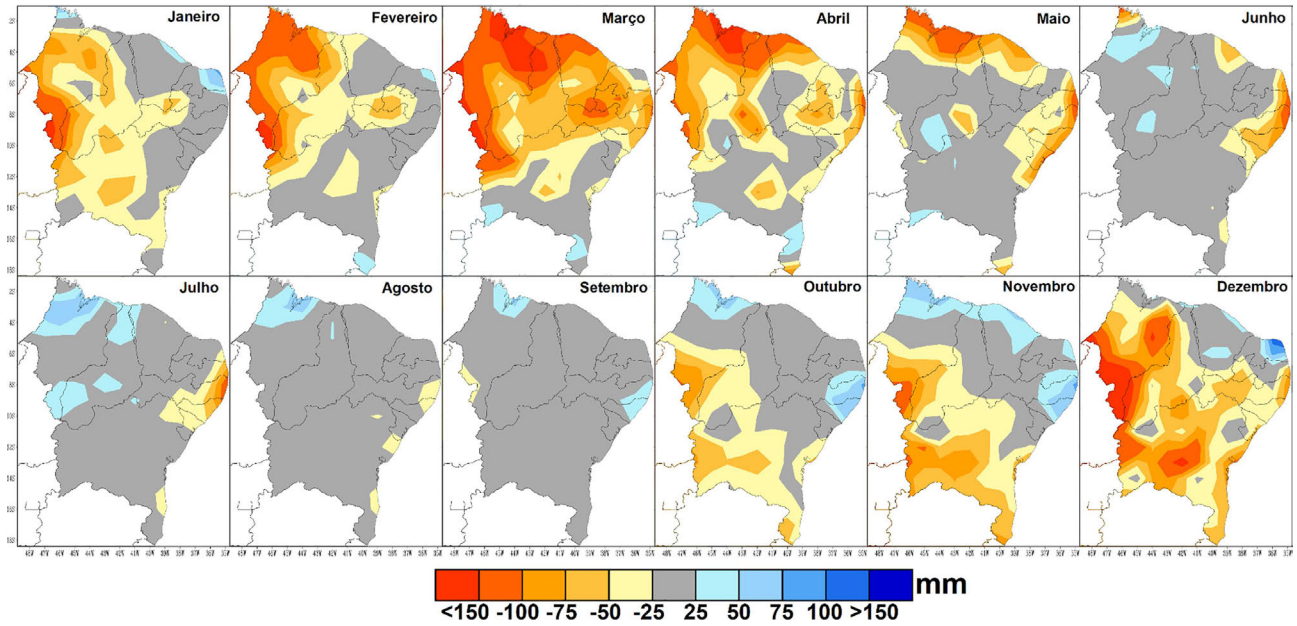


Figura 8 - Diferenças entre as climatologias da precipitação obtidas da média dos modelos para o cenário A1B do período 2021-2080 e as climatologias do período de observações 1961-1990. Tons em azul significam aumento e em laranja redução da precipitação, para janeiro a dezembro em sequência.

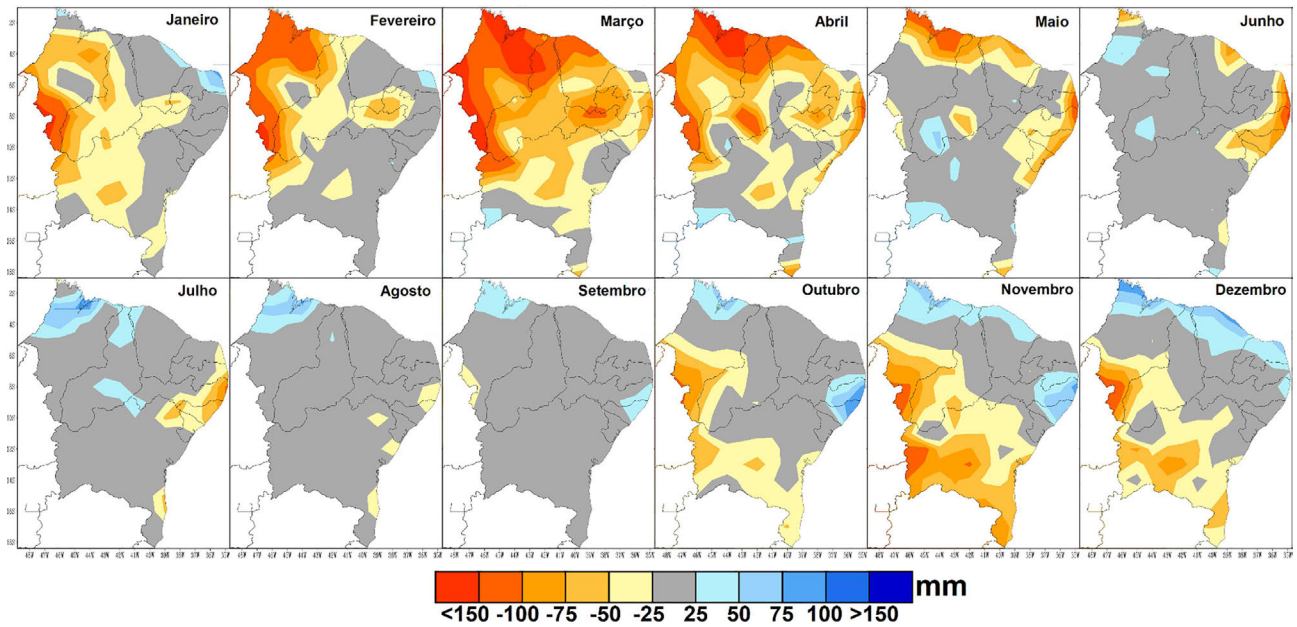


Figura 9 - Análogo a Fig. 8, exceto para o cenário A2.

Para o cenário A2 (Fig. 11), o panorama é similar ao cenário A1B, exceto para o leste do Nordeste mostrando TX próximas as observações entre janeiro e março, e com os desvios negativos do norte do Nordeste perdurando de agosto a dezembro, com destaque para o trimestre outubro a dezembro com desvios inferiores a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ que superam a área observada no cenário A1B.

3.2.3 TN

As TN projetadas para o futuro pelos dois cenários, A1B (Fig. 12) e A2 (Fig. 13) são extremamente similares. Diferente da TX que apresentam meses do ano com desvios negativos em relação a climatologia observada, para TN quase não existem áreas com desvios negativos, ou sendo muito discretas e de pouca intensidade como ocorre em outubro no oeste baiano. O principal destaque além da

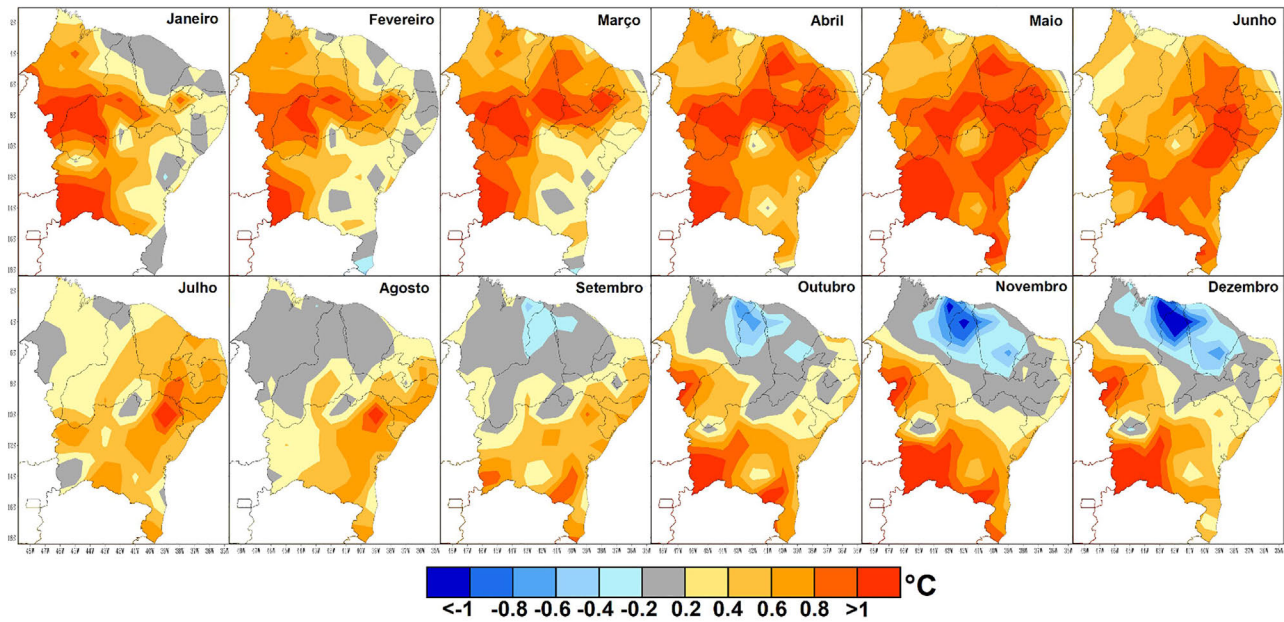


Figura 10 - Diferenças entre as climatologias da temperatura máxima obtidas da média dos modelos para o cenário A1B do período 2021-2080 e as climatologias do período de observações 1961-1990. Tons em azul significam redução e em laranja aumento da temperatura, para janeiro a dezembro em sequência.

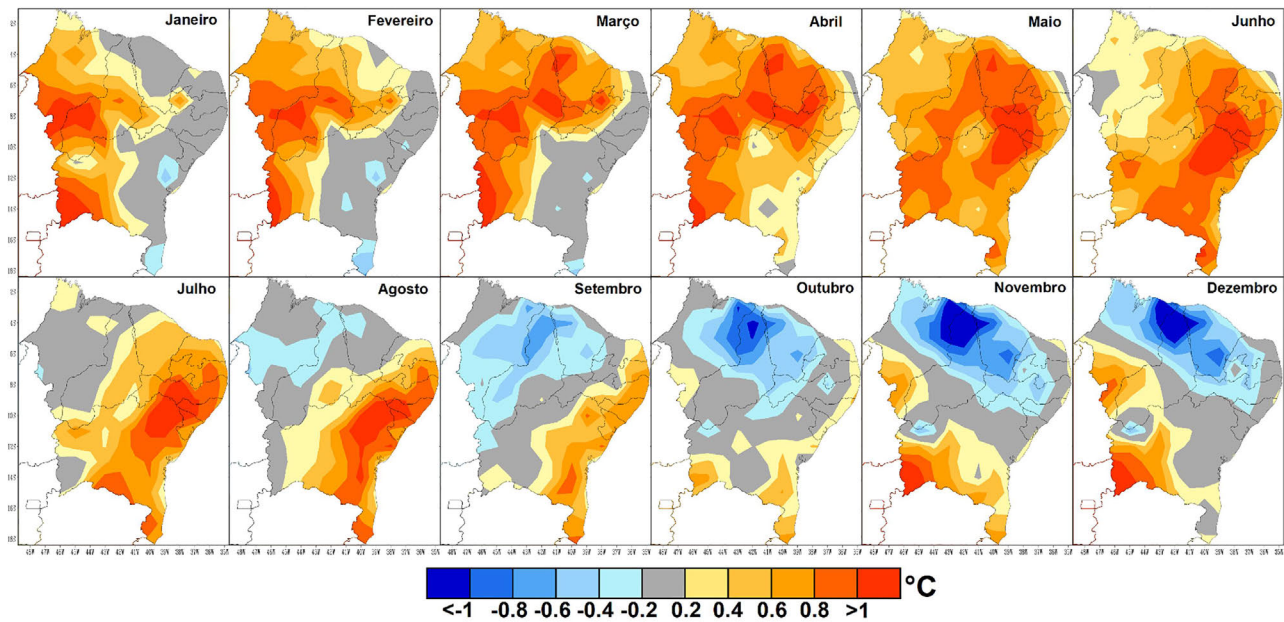


Figura 11 - Análogo a [Fig. 10](#), exceto para o cenário A2.

predominância de desvios positivos todos os meses do ano, é o incremento destes de maio a agosto, durante quase todo o inverno, característica observada nos dois cenários. Esta característica aponta, provavelmente, para um aumento das chamadas noites quentes, quando há um aumento do número de noites com TN superiores ao percentil 90 (Costa *et al.*, 2020).

As projeções climáticas futuras mostram em geral redução da PRCP mensal e aumento das temperaturas para a região Nordeste. Como a PRCP é acumulada, o percentual anual da redução das precipitações é mais significativo do que o aumento das TX e TN médias anuais.

Tais resultados vão de encontro a outros estudos que apontam para essa tendência na região Nordeste. Chou *et*

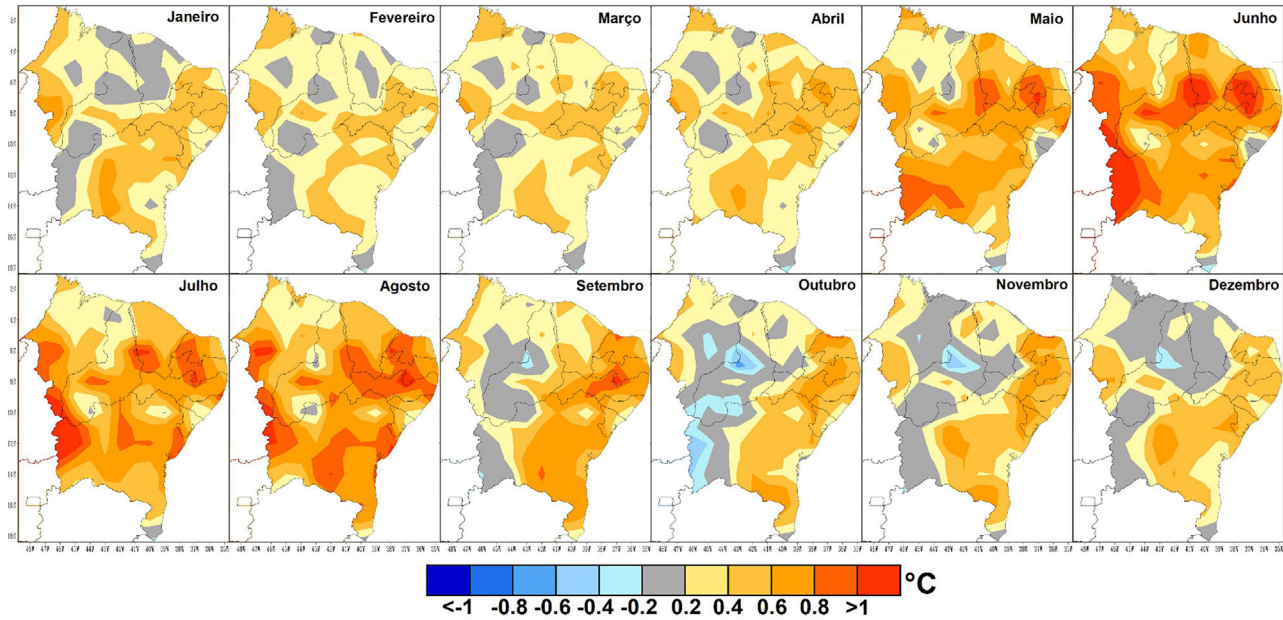


Figura 12 - Diferenças entre as climatologias da temperatura mínima obtidas da média dos modelos para o cenário A1B do período 2021-2080 e as climatologias do período de observações 1961-1990. Tons em azul significam redução e em laranja aumento da temperatura, para janeiro a dezembro em sequência.

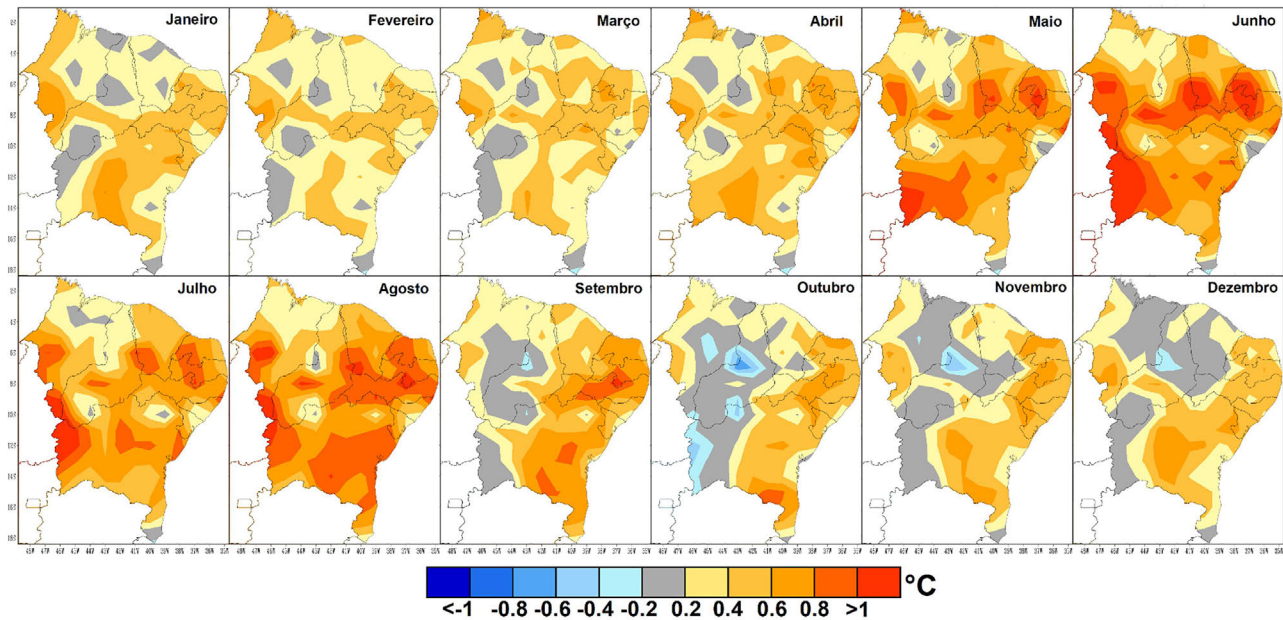


Figura 13 - Análogo a Fig. 12, exceto para o cenário A2.

al. (2014) utilizaram a técnica de *downscaling* dinâmico para gerar cenários de mudanças climáticas para o horizonte 2011-2100 com dois MCGs acoplados ao modelo dinâmico regional ETA, obtendo como respostas para o Nordeste aumento da duração de dias secos consecutivos, com redução da precipitação total do período chuvoso e anual até o final do século e também, incremento nas temperaturas.

Franchito *et al.* (2014) também estudaram projeções de mudanças climáticas com o cenário A1B, aplicadas ao índice de aridez para a América do Sul. Para o Nordeste os resultados indicaram para uma diminuição de chuvas até o final do século acarretando em aumento de até 20% no índice de aridez, provocado por este decréscimo no regime de precipitações e aumento das temperaturas.

No entanto, a maioria dos resultados de mudanças climáticas futuras para a região Nordeste é obtida pelo acoplamento de MCGs a modelos dinâmicos regionais, e a maior parte destes resultados aponta, para as temperaturas, aumentos muito expressivos até o final do século em relação as observações do período 1961-1990 (Guimarães *et al.*, 2016).

A aplicação de SDSM a uma quantidade considerável de séries temporais de estações meteorológicas na região Nordeste é inédita, mostrando que existe uma tendência de aumento das temperaturas que para poucas estações superam os 2 °C anuais. A maior parte se situa entre 1 °C e 2 °C, com outra quantidade considerável de estações apontando aumentos da ordem de 0,5 °C a 1 °C. Um resultado também inédito foi obtido para TX, que apontam inclusive para uma redução no segundo semestre do ano em extensa área do norte do Nordeste.

4. Conclusões

O MDE empregado se ajustou bem as séries temporais de PRCP, TX e TN das estações meteorológicas da região Nordeste, com habilidade em representar a climatologia do período 1961-1990 quando comparada a climatologia observada, com altas correlações entre valores simulados e observados.

Trabalhar com a média (ensemble) dos modelos traz melhores resultados do que analisar cada modelo individualmente. As correlações mensais entre as séries de TX e TN da média dos modelos e as observações foram mais elevadas do que as da precipitação.

Os cenários de mudanças climáticas apontam para uma redução significativa da PRCP de março a maio no norte do Nordeste, de abril a junho no leste do Nordeste, e de outubro a fevereiro no oeste da região. Esses meses coincidem com o período chuvoso destes setores específicos da região Nordeste indicando uma projeção de acentuado déficit de chuvas acumulada anual para a região até o final do século.

Para o período 2021-2080, existe muita similaridade entre os resultados obtidos para os cenários A1B e A2, indicando aumento generalizado das temperaturas máximas no primeiro semestre do ano, restringindo-se ao oeste da Bahia no segundo semestre e dando lugar a extensa área com tendência a diminuição no setor norte do Nordeste. Esse resultado mostra-se mais realçado para o cenário A2. Os cenários indicam para o aumento da TN, ultrapassando 1 °C especialmente durante os meses do inverno.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido durante a concepção deste estudo.

Referências

- ALVES, J.M.B.; CAMPOS, J.N.B.; FILHO, F.A.S.; MONCUNNIL, D.F.; SILVA, E.M.; BARBOSA, W.L.; FERREIRA, A.G.; SUN, L.; MOURA, A.D. Uma avaliação preliminar de simulações climáticas de um modelo regional espectral aninhado em um modelo global (ECHAM 4.5) sobre o setor norte da região Nordeste do Brasil (1971-2000). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 191-206, 2005.
- BARNETT, T.; PREISENDORFER, R. Multifield analog prediction of short-term climate fluctuations using a climate state vector. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 35, n. 10, p. 1771-1787, 1978.
- BELLOUIN N.; BOUCHER, O.; HAYWOOD, J.; JOHNSON, C.; JONES, A.; RAE, J.; WOODWARD, S. Improved representation of aerosols for HadGEM2, **Technical Note 73**. Exeter: Meteorological Office Hadley Centre, 2007.
- BENESTAD, R.E. Downscaling precipitation extremes. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 1-2, p. 1-21, 2010.
- BIAU, G.; ZORITA, E.; VON STORCH, H.; WACKERNAGEL, H. Estimation of precipitation by kriging in the EOF space of the sea level pressure field. **Journal of Climate**, v. 12, n. 4, p. 1070-1085, 1999.
- BRANDS, S.; HERRERA, S.; SAN-MARTIN, D.; GUTIERREZ, J.M. Validation of the ensembles global climate models over southwestern Europe using probability density functions, from a downscaling perspective. **Climate Research**, v. 48, n. 2, p. 145-161, 2011a.
- BRANDS, S.; TABOADA, J.J.; COFIÑO, A.S.; SAUTER, T.; SCHNEIDER, C. Statistical downscaling of daily temperatures in the NW Iberian Peninsula from global climate models: validation and future scenarios. **Climate Research**, v. 48, n. 2-3, p. 163-176, 2011b.
- BRANDS, S.; GUTIERREZ, J.M.; HERRERA, S. On the use of reanalysis data for downscaling. **Journal of Climate**, v. 25, n.7, p. 2517-2526, 2012.
- CARTER, T.R. **General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment**. Helsinki: Finnish Environmental Institute, 2007.
- CAVALCANTI, I. Global climatological features in a simulation using the CPTEC/COLA AGCM. **Journal of Climate**, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURAO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEITA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014.
- COFIÑO, A.S.; SAN-MARTÍN, D.; GUTIÉRREZ, J.M. A Web Portal for Regional Projection of Weather Forecast Using GRID Middleware. In: SHI, Y.; VAN ALBADA, G.D.; DONGARRA, J.; SLOOT, P.M.A. (eds) Computational Science - ICCS 2007. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 4489. Helsinki: Springer, 2007.
- COLLINS, W.J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HINTON, T. C.; JONES, D.; LIDDI-COAT, S.; MARTIN, G.; OCONNOR, F.; RAE, J.; SE-

- NIOR, C.; TOTTERDELL, I.; WOODWARD, S. **Evaluation of the HadGEM2 Model, Technical Note 74**. Excerpt: Meteorological Office Hadley Centre, 2008.
- COLLINS, M.; KNUZZI, R.; ARBLASTER, J.; DUFRESNE, J.L.; FICHEFET, T.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAO, X.; GUTOWSKI, W.J.; JOHNS, T.; KRINNER, G.; SHONGWE, M.; TEBALDI, C.; WEAVER, A.J.; WEHNER, M. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: **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, p. 1029-1136, 2013.
- COSTA, R.L.; BAPTISTA, G.M.M.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; DA ROCHA JÚNIOR, R.L.; SALVADOR, M.A.; HERDIES, D.L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, p. 100254, 2020.
- COULIBALY, P.; DIBIKE, Y.B.; ANCTIL, F. Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. **Journal of Hydrometeorology**, v. 6, n. 4, p. 483-496, 2005.
- CUBASCH, U.; VON STORCH, H.; WASZKEWITZ, J. ZORITA, E. Estimates of climate changes in southern Europe using different downscaling techniques. **Climate Research**, v. 7, n.2, p. 129-149, 1996.
- DIBIKE, Y.B.; COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 145-163, 2005.
- DOUVILLE, H.; CHAUVIN, F.; PLANTON, S.; ROYER, J.F.; SALAS-MÉLIA, D.; TYTECA, S. Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. **Climate Dynamics**, v. 20, n. 1, p. 45-68, 2002.
- FLATO, G.; MAROTZKE, J.; ABIODUN, B.; BRACONNOT, P.; CHOU, S.C.; COLLINS, W.; COX, P.; DRIOUECH, F.; EMORI, S.; EYRING, V.; FOREST, C.; GLECKLER, P.; GUILYARDI, E.; JAKOB, C.; KATSOV, V.; REASON, C.; RUMMUKAINEN, M. Evaluation of Climate Models. In: **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, p. 741-866, 2013.
- FOWLER, H.J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linking climate change modeling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. **International Journal of Climatology**, v. 27, n.12, p. 1547-1578, 2007.
- FRANCHITO, S.H.; REYES FERNANDEZ, J.P.; PAREJA, D. Surrogate Climate Change Scenario and Projections with a Regional Climate Model: Impact on the Aridity in South America. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 3, p. 474-489, 2014.
- FUREVIK, T.; BENTSEN, M.; DRANGE, H.; KINDEM, I.K.T.; KVAMSTØ, N.G.; SORTEBERG, A. Description and evaluation of the bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM. **Climate Dynamics**, v. 21, n. 1, p. 27-51, 2003.
- GATES, L.W. An overview of the results of the atmospheric model intercomparison project (AMIP I). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 1, p. 29-55. 1999.
- GUIMARÃES, S.O.; COSTA, A.A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F.C.; SILVA, E.M.; SALES, D.C.; ARAÚJO JÚNIOR, L.M.; SOUZA, S.G. Projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 337-365, 2016.
- GUTIÉRREZ, J.M.; SAN-MARTIN, D.; BRANDS, S.; MANZANAS, R.; HERRERA, S. Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. **Journal of Climate**, v. 26, n. 1, p. 171-188, 2013.
- GUTZLER, D.S.; ROBBINS, T.O. Climate variability and projected change in the western United States: regional downscaling and drought statistics. **Climate Dynamics**, v. 37, n. 5, p. 835-849, 2011.
- HARPHAM, C.; WILBY, R.L. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. **Journal of Hydrology**, v. 312, n. 1-4, p. 240-255, 2005.
- HARTMANN, D.L.; KLEIN-TANK, A.M.G.; RUSTICUCCI, M.; ALEXANDER, L.V.; BRONNIMANN, S.; CHARABI, Y.; DENTENER, F.J.; DLUGOKENCKY, E.J.; EASTERLING, D.R.; KAPLAN, A.; SODEN, B.J.; THORNE, P.W.; WILD, M.; ZHAI, P.M. Observations: Atmosphere and surface. In: **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, p. 159-254, 2013.
- HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. Circulation mechanisms related to Northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D3, p. 5093-5102, 1993.
- HEWITSON, B.C.; CRANE, R.G. Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 10, p. 1315-1337, 2006.
- HUNTINGFORD, C.; COX, P.M. An analogue model to derive additional climate change scenarios from existing GCM simulations. **Climate Dynamics**, v. 16, n. 8, p. 575-586, 2000.
- HUNTINGFORD, C.; ZELAZOWSKI, P.; GALBRAITH, D.; MERCADO, L.M.; SITCH, S.; FISHER, R.; LOMAS, M.; WALKER, A.P.; JONES, C.D.; BOOTH, B.B.B.; MALHI, Y.; HEMMING, D.; KAY, G.; GOOD, P.; LEWIS, S.L.; PHILLIPS, O.L.; ATKIN, O.K.; LLOYD, J.; GLOOR, E.; ZARAGOZA-CASTELLS, J.; MEIR, P.; BETTS, R.;

- HARRIS, P.P.; NOBRE, C.; MARENGO, J.; COX, P.M. Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change. **Nature Geoscience**, v. 6, p. 268-273, 2013.
- IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Climate Change 2013: **The Physical Science Basis**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- JONES, R.G.; NOGUER, M.; HASSEL, D.C.; HUDSON, D.; WILSON, S.S.; JENKINS, G.J.; MITCHELL, J.F.B. **Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS**. Exeter: Meteorological Office Hadley Centre 40 p., 2004.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, B.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.
- KHAN, M.S.; COULIBALY, P.; DIBIK, Y. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. **Journal of Hydrology**, v. 319, n. 1-4, p. 145-163, 2006.
- KRUIZINGA, S.; MURPHY, A.H. Use of an analogue procedure to formulate objective probabilistic temperature forecasts in the netherlands. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 11, p. 2244-2254, 1983.
- LORENZ, E.N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 26, n. 4, p. 636-646, 1969.
- LUCIO, P.S.; SILVA, F.D.S.; FORTES, L.T.; SANTOS, L.A.R.; FERREIRA, D.B.; SALVADOR, A.M.; BALBINO, H.T.; SARMANHO, G.F.; SANTOS, L.S.F.C.; LUCAS, E.W.M.; BARBOSA, T.F.; DIAS, P.L.S. Um modelo estocástico combinado de previsão sazonal para a precipitação no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 70-87, 2010.
- MARAUN, D.; WETTERHALL, F.; IRESO, A.M.; CHANDLER, R.E.; KENDON, E.J.; WIDMANN, M.; BRIENEN, S.; RUST, H.W.; SAUTER, T.; THEMEL, M.; VENEMA, V.K.C.; CHUN, K.P.; GOODESS, C.M.; JONES, R.G.; ONOF, C.; VRAC, M.; THIELE-EICH, I. Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 3, p. 1-38, 2010.
- MARSLAND, S.J.; HAAK, H.; JUNGCLAUS, J.H.; LATIF, M.; ROESKE, F. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. **Ocean Modelling**, v. 5, n. 2, p. 91-127, 2003.
- MECHOSO, C.R.; LYONS, S.W.; SPHAR, J.A. The impact of sea surface temperature anomalies on the rainfall over Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 3, n. 8, p. 812-826, 1990.
- MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Science**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- MOLION, L.C.B.; LUCIO, P.S. A note on Pacific decadal oscillation, El Nino Southern oscillation, atlantic multidecadal oscillation and the intertropical front in Sahel, Africa. **Atmospheric and Climate Science**, v. 3, n. 3, p. 269-274, 2013.
- MURPHY, J. Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques. **International Journal of Climatology**, v. 20, n. 5, p. 489-501, 2000.
- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GRÜBLER, A.; JUNG, T.Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E.L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RAIHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H.H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. IPCC: **Special Report on Emissions Scenarios**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- PRUDHOMME, C.; WILBY, R.L.; CROOKS, S.; KAY, A.L.; REYNARD, N.S. Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk. **Journal of Hydrology**, v. 390, n. 3, p. 198-209, 2010.
- RADDATZ, T.J.; REICK, C.H.; KNORR, W.; KATTGE, J.; ROECKNER, E.; SCHNUR, R.; SCHNITZLER, K-G.; WETZEL, P.; JUNGCLAUS, J. Will the tropical land biosphere dominate the climate-carbon cycle feedback during the twenty first century? **Climate Dynamics**, v. 29, n. 6, p. 565-574, 2007.
- RANDALL, D.A.; WOOD, R.A.; BONY, S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T.; FYFE, J.; KATTSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R.J.; SUMI, A.; TAYLOR, K.E. Climate models and their evaluation. In: **Climate Change**. SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (eds) Cambridge: Cambridge University Press, p. 589-662, 2007.
- SALAS-MELIÁ, D. A global coupled sea ice-ocean model. **Ocean Modelling**, v. 42, n. 2, p. 137-172, 2002.
- SILVA, F.D.S.; PEREIRA FILHO, A.J.; HALLAK, R. Classificação de sistemas meteorológicos e comparação da precipitação estimada pelo radar e medida pela rede telemétrica na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 292-307, 2009.
- SRES - Emissions Scenarios: A Special Report of IPCC Working Group III. **Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change**, ISBN: 92-9169-113-5, 2010.
- TEIXEIRA, F.V.B.; TANAJURA, C.A.S.; TOLEDO, E.M. An investigation of the ZCAS with extend simulations of the atmospheric model RAMS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p.83-89, 2002.
- TEUTSCHBEIN, C.; WETTERHALL, F.; SEIBERT, J. Evaluation of different downscaling techniques for hydrological climate-change impact studies at the catchment scale. **Climate Dynamics**, v. 37, n. 9-10, p. 2087-2105, 2011.
- TIMBAL, B.; DUFOUR, A.; MCAVANEY, B. An estimate of future climate change for western France using a statistical downscaling technique. **Climate Dynamics**, v. 20, n. 7, p. 807-823, 2003.

- TIMBAL, B.; JONES, D.A. Future projections of winter rainfall in southeast Australia using a statistical downscaling technique. **Climatic Change**, v. 86, n. 1, p. 165-187, 2008.
- TOEWS, M.W.; ALLEN, D.M. Simulated response of groundwater to predicted recharge in a semi-arid region using a scenario of modeled climate change. **Environmental Research Letters**, v. 4, p. 1-19, 2009.
- UPPALA, S.M.; KALLBERG, P.W.; SIMMONS, A.J.; ANDRAE, U.; BECHTOLD, V.C.; FIORINO, M.; GIBSON, J.K.; HASELER, J.; HERNANDEZ, A.; KELLY, G.A.; LI, X.; ONOGI, K.; SAARINEN, S.; SOKKA, N.; ALLAN, R.P.; ANDERSSON, E.; ARPE, K.; BALMASEDA, M.A.; BELJAARS, A.C.M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; CAIRES, S.; CHEVALLIER, F.; DETHOF, A.; DRAGOSAVAC, M.; FISHER, M.; FUENTES, M.; HAGEMANN, S.; HOLM, E.; HOSKINS, B.J.; ISAKSEN, L.; JANSSEN, P.A.E.M.; JENNE, R.; MCNALLY, A.P.; MAHFOUF, J-F.; MORCLETTE, J.J.; RAYNER, N.A.; SAUNDERS, R.W.; SIMON, P.; STERL, A.; TRENBERTH, K.E.; UNTCH, A.; VASILJEVIC, D.; VITERBO, P.; WOOLLEN, J. The era-40 re-analysis. **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society**, v. 131, n. 612, p. 2961-3012, 2005.
- VAN DEN DOOL, H. Searching for analogs, how long must we wait? **Tellus**, v. 46, n. 3, p. 314-324, 1994.
- WARD, M.N.; FOLLAND, C.K. Prediction of seasonal rainfall in the north nordeste of Brazil using eigenvectors of sea-surface temperature. **International Journal of Climatology**, v.11, n. 7, p.711-43. 1991.
- WILBY, R.L. WIGLEY, T.M.L. Downscaling general circulation model output: A reappraisal of methods and limitations. In Climate Prediction and Agriculture. **Proceedings of the START/WMO International Workshop**, Washington, DC, p. 39-68, 2000.
- WILBY, R.L.; DAWSON, C.W.; BARROW, E.M. SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. **Environmental Modelling and Software**, v. 17, n. 2, p. 147-159, 2002.
- WILBY, R.L.; CHARLES, S.P.; ZORITA, E.; TIMBAL, B.; WHETTON, P.; MEARN, L.O. **Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods**. Available at: http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf, 2004a.
- WILBY, R.L.; DAWSON, C.W. SDSM 4.1 - **A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts**. Environment Agency of England and Wales, Nottingham, 2004b.
- WILBY, R.L.; HARRIS, I. SDSM - A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. **Water Resources Research**, v. 42, n. 2, p. 1-10, 2006.
- WILBY, R.L.; FOWLER, H.J. **Regional climate downscaling. In Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources**. Fung CF, Lopez A, New M (eds). Wiley-Blackwell Publishing: Chichester, 2010.
- WILBY, R.L.; DAWSON, C.W. The Statistical DownScaling Model (SDSM): Insights from one decade of application. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 7, p. 1707-1719, 2013.
- XAVIER, T.M.B.S.; XAVIER, A.F.S.; DIAS, P.L.S.; DIAS, M.A.F.S. Previsão regional de chuva para o Estado do Ceará através do projeto “Tempo de Chuva”: 1964-1999. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n. 3, p. 69-92. 2000.
- XU, C.Y.; WIDEN, E.; HALLDIN, S. Modelling Hydrological Consequences of Climate Change - Progress and Challenges. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 22, n. 6, p.789-797, 2005.
- ZORITA, E.; HUGHES, J.P.; LETTENMAIER, D.P.; VON STORCH, H. Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. **Journal of Climate**, v.8, n. 5, p.1023-1042, 1995.
- ZORITA, E.; VON STORCH, H. The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. **Journal of Climate**, v. 12, n. 8, p. 2474-2489, 1999.