

Artigo

## Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX

Sullyandro Oliveira Guimarães<sup>1</sup>, Alexandre Araújo Costa<sup>1</sup>,  
Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior<sup>2</sup>, Emerson Mariano da Silva<sup>1</sup>,  
Domingo Cassain Sales<sup>3</sup>, Luiz Martins de Araújo Júnior<sup>2</sup>, Samuel Galvão de Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

<sup>2</sup>*Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

<sup>3</sup>*Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.*

Recebido: 30/11/2015 – Aceito: 2/6/2016

### Resumo

Neste trabalho são analisados o desempenho e as projeções de simulações climáticas de Modelos Globais do CMIP5, e de Modelos Climáticos Regionais do CORDEX para o Nordeste do Brasil (NEB). Para este estudo, o clima do NEB foi caracterizado com base nas seguintes variáveis: temperatura do ar próximo à superfície (TAS), precipitação (PR), evapotranspiração potencial (ETo), e Índice de Aridez (IA). Na metodologia de verificação dos modelos foram utilizadas métricas estatísticas como erro quadrático médio, viés estatístico, correlação de Pearson e índice de concordância. Em geral, a média do conjunto das simulações (M) produz uma significativa representação do clima recente (1985-2005) do NEB. As projeções de M para os cenários de emissões futuras de gases de efeito estufa, RCP4.5 e RCP8.5, são de aumento generalizado da temperatura, 2079-2099 (longo prazo) entre 2,1 °C (RCP4.5) e 4 °C (RCP8.5). As taxas de ETo devem aumentar no decorrer do século XXI, com a média de longo prazo no RCP8.5 15% maior do que os valores de referência do clima recente. A projeção de precipitação é mais inconclusiva devido ao espalhamento entre o conjunto das simulações, com M indicando uma anomalia de precipitação de -1,6% no RCP8.5. O IA projetado é menor na maior parte das simulações, sugerindo uma tendência de aumento de aridez sobre o NEB durante este século.

**Palavras-chave:** Nordeste brasileiro, CMIP5, CORDEX.

## Climate Change Projections over the Brazilian Northeast of the CMIP5 and CORDEX Models

### Abstract

This work addresses the performance and projections of climate simulations from CMIP5 global models and CORDEX regional climate models over Northeast Brazil (NEB). For this study, NEB climate was characterized by the following variables: near surface air temperature (TAS), precipitation (PR), potential evapotranspiration (ETo), and aridity index (IA). In verification methodology of the models we utilized statistical metrics such as mean square error, statistical bias, Pearson correlation and concordance index. In general, the ensemble mean of the simulations (M) produces a significant representation of NEB recent (1985-2005) climate. The projections of M for scenarios of future emissions of greenhouse gases, RCP4.5 and RCP8.5, show generalized increase in the temperature, with 2079-2099 (long-term) temperature anomalies over NEB ranging between 2.1 °C (RCP4.5) and 4 °C (RCP8.5). The ETo rates are more likely to increase during the 21st century, with the RCP8.5 long-term mean 15% higher than reference values for recent climate. Projection of precipitation is inconclusive due to significant spread among the individual simulations, with M indicating a anomaly of -1.6% in RCP8.5 long-term mean. Projected IA is reduced in most simulations of future climate, suggesting a greater chance of increased aridity over NEB during this century.

**Keywords:** Northeast Brazil, CMIP5, CORDEX.

## 1. Introdução

Diversas modificações provocadas pela ação humana no sistema climático estão sendo observadas, e as causas mais discutidas são as mudanças nas concentrações de gases de efeito estufa (GEEs), no uso da terra, nas quantidades de aerossóis na atmosfera, etc. Essas modificações têm impactos no clima, tanto regionalmente quanto globalmente (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

Muitas regiões das Américas Tropicais têm considerável vulnerabilidade às mudanças climáticas e necessitam de mais estudos acerca do seu clima, como a Amazônia e o Nordeste do Brasil (NEB), sujeitas a alterações na distribuição de eventos extremos, veranicos, distribuição espacial de chuvas, etc., com diversos sistemas contribuindo para a variabilidade climática e possivelmente a alterações climáticas naturais e antrópicas (Ribeiro *et al.*, 1996; Oyama e Nobre, 2003; Kayano e Andreoli, 2009; PBMC, 2012). Sobre o NEB - que também é assolado com períodos de seca - projeções para o clima futuro são fundamentais para estratégias de adaptação e combate à vulnerabilidade, sendo esta região o foco do presente estudo.

A influência antrópica sobre o clima resalta as vulnerabilidades dos sistemas humanos e naturais. Estudos de riscos, impactos, adaptação e estratégias de mitigação frente às mudanças climáticas nesses sistemas se fazem necessários. A importância desse tipo de abordagem requer, assim, informação precisa e com mais detalhes possível, no caso, em escala regional ou local (IPCC, 2014; Xianfu, 2006).

Problemas futuros são então uma das temáticas do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) e do CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), com o CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*) - em sua quinta fase (CMIP5) - organizando os experimentos com Modelos de Circulação Geral (MCGs) que servem de base para as projeções de mudanças climáticas do AR5 (*IPCC Fifth Assessment Report*).

O Projeto CORDEX vem padronizando experimentos de *downscaling*, em domínios que cobrem partes e/ou continentes inteiros, com o objetivo de melhorar os estudos de impactos de mudanças climáticas regionais, já que a aplicação de técnica de redução de escala tem o objetivo de prover melhores resultados quanto à representação do clima local (Giorgi *et al.*, 2009). E assim como algumas simulações regionais apresentadas no AR4 (*IPCC Fourth Assessment Report*), são apresentados no AR5 resultados de Modelos Climáticos Regionais (MCRs) do CORDEX (Flato *et al.*, 2013).

O semiárido é o espaço geográfico mais vulnerável aos efeitos da desertificação no Brasil (Lima *et al.*, 2011), compreendendo 11,53% do território nacional, predominantemente na região nordeste (56,46% - INSA, 2012), com regime de chuvas irregularmente distribuídas no espaço e no tempo, precipitações em torno de 800 mm ao ano, concentradas em períodos de três a cinco meses, e pelas

elevadas médias anuais de temperatura (27 °C) e evapotranspiração potencial (2.000 mm/ano), apresentando balanço hídrico negativo em grande parte do ano, com solo ralo e bioma Caatinga (Lima *et al.*, 2011). Este bioma se encontra entre os mais vulneráveis em um cenário de mudanças na cobertura vegetal da porção tropical da América do Sul (Oyama e Nobre, 2003), pois o aumento da temperatura, associado a atividades antrópicas de remoção da vegetação de Caatinga, propicia a ocorrência de aridização e desertificação.

Um estudo de Marengo (2009) mostra projeções para o século 21 dos MCGs utilizados no AR4, que apontam aquecimento em todo o Brasil. No NEB, os MCGs divergem nos resultados projetados para a precipitação, entre aumento e diminuição, mas a média dos modelos indica maior probabilidade de redução de chuvas - possível decorrência do aquecimento global; assim citado também: "Para o Nordeste, a tendência é de redução de chuvas acompanhada de aumento da temperatura para finais do século XXI" (Marengo e Valverde, 2007).

As projeções do PBMC (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas) para o NEB são de decréscimo entre 10% e 20% da precipitação e aumento de 0,5 a 1 °C da temperatura do ar durante as próximas três décadas (até 2040), com aumento gradual de temperatura de 1,5 a 2,5 °C e diminuição entre 25% e 35% nos padrões de chuva no período de 2041-2070. Condições significativamente mais quentes (aumento de temperatura entre 3,5 e 4,5 °C) e agravamento do déficit hídrico regional com diminuição de praticamente metade (40% a 50%) da distribuição de chuva são indicadas no final do século (2071-2100) nas projeções. Essas mudanças podem desencadear o processo de desertificação da caatinga (PBMC, 2012).

Silveira *et al.* (2013a) analisando 25 simulações de modelos globais utilizados no AR4, para os cenários futuros A1B, A2 e B1 do SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), observaram que os modelos divergem nas projeções de precipitação para o Nordeste Setentrional do Brasil para o período de 2010 a 2099, discorrendo que o espalhamento dos resultados sejam devido as incertezas envolvidas com a precipitação - fenômenos meteorológicos e/ou dificuldade na representação dos fenômenos de meso e microescala não resolvidos por causa da resolução espacial. Concluindo que a maioria dos resultados dos modelos no estudo não indica tendência nas projeções da precipitação anual. Ainda que, um conjunto de dez modelos, com melhores desempenhos para a região, indique uma margem de mudança entre 15% e -42% na precipitação anual média em relação ao século XX.

Em estudo semelhante para o NEB, Silveira *et al.* (2013b) avaliaram a representação climática de 7 modelos globais do CMIP5, e analisaram as projeções de precipitação para o cenário RCP8.5 (altas emissões) para o século XXI. As análises mostraram que os modelos são capazes de capturar os padrões de variações sazonais, em que a maioria

capta os padrões interanuais, com algumas simulações apresentando valores bastante elevados de correlações em relação à precipitação observada no século XX, embora exista dificuldade da maioria dos modelos estudados em representar variações interdecadais.

As projeções dadas em Silveira *et al.* (2013b) apontam, para grande parte dos modelos analisados, impactos na precipitação sobre o NEB, maiores nos meses dezembro, janeiro e fevereiro, porém se têm divergência quanto a aumento e redução para o RCP8.5.

Sales *et al.* (2015), por sua vez, utilizando resultados de simulação regional, mostram projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro. A simulação regional de *downscaling* dinâmico do RAMS6.0 (*Regional Atmospheric Modeling System, version 6*), forçado com o modelo global HadGEM2-ES, conseguiu reproduzir características do clima recente, que inclui distribuição sazonal e padrões espaciais de precipitação e temperatura (em alguns casos). Para Sales *et al.* (2015), o uso do RAMS6.0 permitiu uma melhor representação de alguns aspectos climáticos do clima presente, e a correção de alguns erros que o HadGEM2-ES, como nos campos de ambas as variáveis estudadas sobre o NEB, na fase do ciclo anual de precipitação e na redução do viés frio. Colocando ainda que alguns erros do MCG são amplificados e erros sistemáticos inerentes ao próprio modelo regional são introduzidos. Tendo então que para os dois modelos, RAMS6.0 e HadGEM2-ES, se têm viés: frio durante o ano todo, úmido na estação chuvosa, e seco na estação seca para as duas sub-regiões abordadas (Norte e Sul do NEB), no período de 1986 a 2005 em relação a dados observados.

O clima futuro do NEB, segundo Sales *et al.* (2015), pode mudar nos aspectos das variáveis de temperatura e de precipitação simuladas com o RAMS6.0, nos seguimentos: redução de precipitação na estação seca em médio (2046-2065) e longo (2080-2099) prazo, aumento nos meses de verão nos três períodos do clima futuro analisados (2016-2035, 2046-2065 e 2080-2099), e aumento da temperatura no decorrer do século XXI, para o cenário de altas emissões de GEEs RCP8.5.

Para as projeções regionais do AR5 é muito provável que as temperaturas vão aumentar ao longo do todo o continente, com maior aquecimento projetado no sul da Amazônia, e que menos chuvas ocorrerão no leste da Amazônia, nordeste e leste do Brasil durante a estação seca. No entanto, na estação chuvosa há confiança média nas mudanças na precipitação ao longo destas regiões, com alta confiança no aumento de extremos de precipitação (Christensen *et al.*, 2013).

Mudanças preocupantes sobre o NEB traduzem a importância do estudo climático do presente e das projeções futuras para a região (Lima *et al.*, 2011), abordando as mais recentes informações, resultados de modelos com melhoramentos na representação do sistema terrestre, tanto

em resolução quanto em representação física (Cubasch *et al.*, 2013).

A precipitação é uma variável de papel fundamental do ciclo hidrológico, para a sociedade humana e para os ecossistemas naturais, seja na geração de energia por hidrelétrica, no consumo humano, na manutenção dos ecossistemas ou outras aplicações essenciais (Dinpashoh *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2012). Mas, como exemplificado por Scheff e Frierson (2015), duas regiões que apresentam mesma média anual de precipitação, mas diferentes taxas de Evapotranspiração potencial (ETo), podem experimentar regimes hídricos bastante distintos, como por exemplo, uma apresentar clima úmido e outra um clima mais seco e até semiárido.

O Índice de Aridez (IA), indicador de susceptibilidade à desertificação, segue critérios estabelecidos pela UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 1979), consistindo da razão entre a quantidade anual de água precipitada em uma região e a correspondente perda máxima possível de água para a atmosfera (Evapotranspiração Potencial). Este índice é apontado como o melhor indicador de áreas vulneráveis à desertificação, uma vez que trabalha com variáveis quantitativas (Sampaio *et al.*, 2003; CONAMA, 2008; Freitas, 2005), sendo adotado no *World Atlas of Desertification* da UNEP (1992) e em outros estudos (Matallo Junior, 2003).

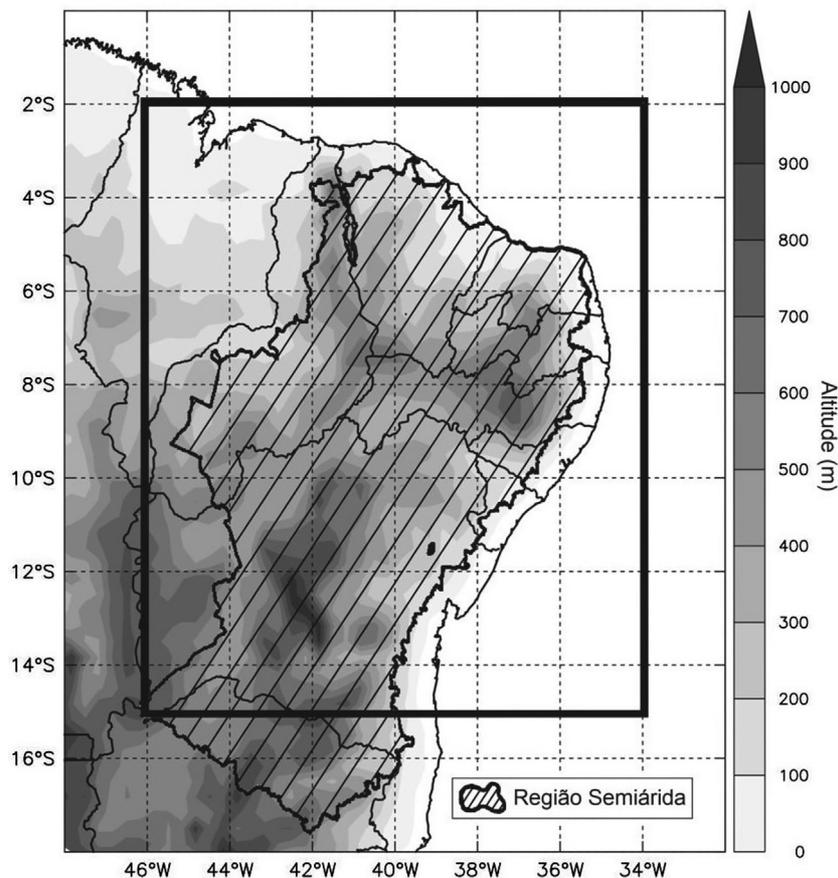
O objetivo principal deste trabalho é analisar as projeções climáticas dos modelos do CMIP5 e dos dados de *downscaling* do CORDEX sobre o Nordeste do Brasil. E assim verificar as mudanças que os modelos climáticos apontam na região, abordando as variáveis de precipitação (PR), temperatura do ar próximo à superfície (TAS; a 2 m), evapotranspiração potencial (ETo) que indica a perda de umidade da superfície, e consequente o índice de aridez (IA) usado para análises de susceptibilidade à ocorrência da desertificação.

## 2. Materiais e Métodos

Os pontos centrais a serem explanados com a metodologia são: avaliação das simulações históricas dos modelos climáticos, visando conhecer a representação do clima sobre o NEB por parte dos modelos; e projeções futuras para cenários de mudanças climáticas.

### 2.1. Região de estudo

A região específica do NEB escolhida para as análises está destacada na Fig. 1. As coordenadas são: 34° W a 46° W, e 2° S a 15° S. Essa região especificada é utilizada nas médias espaciais dos resultados, onde é feita média ponderada em relação à porcentagem de área de terra contida em cada caixa de grade. Desta forma, a caixa de grade onde houver somente terra se pondera com 1 e onde houver somente oceano, com 0.



**Figura 1** - Representação do relevo da região do Nordeste do Brasil. O quadro em preto (linha espessa) delimita a área escolhida para as análises. Os limites preenchidos com linhas diagonais representam a nova delimitação do seminário brasileiro (Brasil, 2007).

## 2.2. Dados climáticos

### 2.2.1. Observações

Dados observados e/ou de reanálises (dados assimilados por modelos de controle) são então requeridos na análise da destreza dos modelos em simular o clima histórico, para tanto fazendo uso de índices estatísticos para comparar as variáveis.

PR e TAS utilizadas nas análises são do *Climatic Research Unit* (CRU) TS3.22 (Harris *et al.*, 2014). ETo foi obtida pela aplicação da metodologia de Penman-Monteith indicada pela FAO (Penman-Monteith-FAO), descrita em Allen *et al.* (1998).

Em Penman-Monteith-FAO são considerados todos os parâmetros que governam as trocas de energia e fluxo de calor latente, onde a maioria dos parâmetros pode ser medida ou estimada caso se tenha dados meteorológicos. A equação que se segue se dá a evapotranspiração potencial de Penman-Monteith-FAO (Eq. (1)).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Na Eq. (1) se tem que:  $ET_o$  - Evapotranspiração potencial de referência, em mm/dia;  $R_n$  - Saldo de radiação na superfície, em MJ/m<sup>2</sup> dia;  $G$  - Fluxo de calor do solo, em MJ/m<sup>2</sup> dia;  $T$  - Temperatura do ar próximo à superfície (2 m), em °C;  $U_2$  - Velocidade do vento próximo à superfície (2 m), em m/s;  $e_s$  - Pressão de vapor de saturação média, em kPa;  $e_a$  - Pressão parcial de vapor, em kPa;  $\Delta$  - Declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em kPa/°C; e  $\gamma$  - Constante psicrométrica, em kPa/°C.

Para a aplicação da metodologia de Penman-Monteith-FAO se utilizou dos dados observados em médias mensais do CRU - temperatura mínima diária próximo a superfície (TASMIN), temperatura máxima diária próximo a superfície (TASMAX), pressão parcial de vapor ( $e_a$ ) - Harris *et al.* (2014), e velocidade do vento à 10 m (SFCWIND) - New *et al.* (1999). Mas as variáveis de radiação escolhidas para o cálculo da ETo foram as da reanálise 2 do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), descritas em Kanamitsu *et al.* (2002) - RSDS (radiação solar incidente na superfície), RSUS (radiação solar refletida pela superfície), RLDS (radiação de onda longa em direção à superfície), RLUS (radiação de onda longa emitida pela superfície).

Essa abordagem de utilizar variáveis do CRU e do NCEP foi escolhida por simplificar a metodologia de Penman-Monteith-FAO, e obter melhor representação da variabilidade anual. Em Harris *et al.* (2014) são utilizados, além das mesmas variáveis do CRU que se escolheu para essa análise, a nebulosidade e valores climatológicos de radiação quando da aplicação de Penman-Monteith-FAO. Os resultados de Harris *et al.* (2014) não mostram variabilidade anual de ETo durante todo o século XX de forma muito expressiva, enquanto que fazendo uso dos dados de radiação do NCEP no cálculo de ETo para apenas o final do século se mostrou mais condizente à variabilidade anual.

A classificação do IA é dada na Tabela 1, este calculado para os dados climáticos dividindo as médias anuais de PR pelas respectivas médias anuais de ETo.

### 2.2.2. Modelos de circulação geral

A lista dos modelos climáticos globais utilizados é mostrada na Tabela 2, onde algumas informações das características dos modelos participantes do CMIP5 estão citadas como espaçamento de grade horizontal na componente atmosférica, quantidade de níveis verticais e componentes dos modelos. As componentes indicadas são aquelas para as quais o modelo tem pelo menos uma equação prognóstica com base física, e acoplamento com outra componente, permitindo *feedbacks* climáticos (efeito indireto de realimentação do sistema climático) - AT (Atmosfera), ST (Superfície de terra), OC (Oceano), GM (Gelo marinho), AE (Aerossóis), QA (Química da atmosfera), CT (Ciclo do carbono terrestre), e BO (Ciclos biogeoquímicos do oceano).

### 2.2.3. Modelos climáticos regionais

Os dados de simulações regionais adotados são resultados dos MCRs dados na Tabela 3. Para cada modelo regional se tem associado um MCG, cujos dados serviram de condicionantes ao rodar o MCR.

Os domínios CAM44i e SAM44i são denominações do CORDEX, representam os dados regionalizados nas áreas da América Central (CAM, 35,25 N-19,75 S e 21,75 W-124,75 W) e América do Sul (SAM, 18,75 N-58,25 S e 16,25 W-106,25 W), e interpolados para grade com espaçamento regular de 0,5 graus (Christensen *et al.*, 2014). A

simulação indicada na Tabela 3 se refere às características de inicialização do modelo.

Nas simulações do modelo RAMS realizadas pelos autores na UECE foram utilizados 29 níveis verticais em coordenada sigma-z, variando entre 100 m próximo à superfície e 1,3 km próximo ao topo do modelo (aproximadamente 20,8 km). A parametrização do fluxo de radiação de onda curta e de onda longa é de Chen-Cotton (Chen e Cotton, 1983), de convecção Kain-Fritsch (Fritsch e Chappell, 1980; Kain e Fritsch, 1990), com transporte turbulento por Mellor-Yamada (Mellor e Yamada, 1974, 1982), e microfísica de nuvens de Walko *et al.* (1995). Outras informações podem ser encontradas em Sales *et al.* (2015).

O modelo RCA4 (*Rossby Centre regional atmospheric model version 4*; Samuelsson *et al.*, 2011) tem convecção de Kain-Fritsch, esquema de terra-superfície é da segunda geração de LSSs (Sellers *et al.*, 1997), cobertura da floresta e solo têm balanços energéticos separados tendo temperaturas prognósticas distintas (Shuttleworth e Wallace, 1985). O esquema de radiação usado é HIRLAM (Savijärvi, 1990; Sass *et al.*, 1994), e para turbulência esquema de prognóstico seco de energia cinética turbulenta, combinado com diagnóstico de mistura de comprimentos e modificações (Cuxart *et al.*, 2000; Samuelsson *et al.*, 2011), sendo utilizado 24 níveis verticais em coordenadas híbridas sigma-z (Simmons e Burridge, 1981).

Para a ETo calculada com os dados dos modelos climáticos, seguindo Penman-Monteith-FAO, foram utilizadas as variáveis: TASMIN, TASMAL, SFCWIND, RSDS, RSUS, RLDS, RLUS, e HURS - umidade relativa próximo a superfície (2 m).

## 2.3. Avaliação para o clima presente

Simulações do clima presente, comumente referidas como simulações do século XX, são caracterizadas no experimento *Historical* (denominado neste trabalho como período histórico) do CMIP5. A “rodada” (jargão para simulação) histórica é feita de 1850 a 2005, forçando os modelos com as mudanças nas composições atmosféricas observadas (refletindo ambas as fontes, antrópica e natural), incluindo as mudanças no uso e ocupação do solo, e emissões antrópicas de aerossóis no passar desse período (Taylor *et al.*, 2012; Flato *et al.*, 2013).

A performance dos modelos nas simulações do período histórico pode ser estudado através de várias medidas, cada forma apresentando vantagens e desvantagens. As métricas estatísticas usadas para comparar as simulações com as observações são o viés (*bias* estatístico), viés percentual, a correlação (temporal - COT; e espacial - COP), e os erros - Erro Absoluto Médio (EAM), o Erro Quadrático Médio (EQM) (Wilks, 2011). O índice de confiança (IC) de Camargo e Sentelhas (1997) foi utilizado nas análises das séries temporais. Esse índice relaciona a correlação e o índice de concordância (ICW) de Willmott *et al.* (1985), estimando (0-1) o quanto duas séries se aproximam e se

**Tabela 1** - Classificação do Índice de Aridez quanto ao clima de acordo como a UNEP (1992).

Valores	Classe
$IA < 0,05$	Hiperárido
$0,05 \leq IA < 0,20$	Árido
$0,20 \leq IA < 0,50$	Semiárido
$0,50 \leq IA < 0,65$	Subúmido seco
$0,65 \leq IA$	Subúmido e úmido

Fonte: Adaptada de Matallo Junior (2003).

**Tabela 2** - MCGs do CMIP5. Resolução horizontal característica e níveis verticais são da componente atmosférica, onde se considerou 1 grau (lat e lon) como aproximadamente 111 km. N é um número atribuído para fim de organização dos resultados.

N	Modelo	Resolução (km)		Níveis verticais	Componentes							
		Lon	Lat		AOGCMs			ESMs				
1	ACCESS1-0	208,4	137,9	38	AT	ST	OC	GM	AE	QA	CT	BO
2	ACCESS1.3	208,4	137,9	38	AT	ST	OC	GM	AE			
3	bcc-csm1-1	312,5	312,5	26	AT	ST	OC	GM			CT	BO
4	bcc-csm1-1-m	125,0	125,0	26	AT	ST	OC	GM			CT	BO
5	BNU-ESM	312,5	312,5	26	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
6	CanESM2	312,5	312,5	35	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
7	CESM1-CAM5	138,9	104,2	27	AT	ST	OC	GM	AE			
8	CMCC-CM	83,3	83,3	31	AT	ST	OC	GM	AE			
9	CMCC-CMS	208,4	208,4	95	AT	ST	OC	GM	AE			
10	CNRM-CM5	156,3	156,3	31	AT	ST	OC	GM		QA		BO
11	CSIRO-Mk3-6-0	208,4	208,4	18	AT	ST	OC	GM	AE			
12	GFDL-CM3	277,8	222,2	48	AT	ST	OC	GM	AE	QA		
13	GFDL-ESM2G	277,8	222,2	24	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
14	GFDL-ESM2M	277,8	222,2	24	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
15	GISS-E2-H	277,8	222,2	40	AT	ST	OC	GM	AE	QA		
16	GISS-E2-H-CC	277,8	222,2	40	AT	ST	OC	GM				BO
17	GISS-E2-R	277,8	222,2	40	AT	ST	OC	GM	AE	QA		
18	GISS-E2-R-CC	277,8	222,2	40	AT	ST	OC	GM				BO
19	HadGEM2-AO	208,4	137,9	60	AT	ST	OC	GM	AE			
20	HadGEM2-CC	208,4	137,9	60	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
21	HadGEM2-ES	208,4	137,9	38	AT	ST	OC	GM	AE	QA	CT	BO
22	inmcm4	222,2	166,7	21	AT	ST	OC	GM			CT	BO
23	IPSL-CM5A-LR	416,7	208,4	39	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
24	IPSL-CM5A-MR	277,8	139,9	39	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
25	IPSL-CM5B-LR	416,7	208,4	39	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
26	MIROC5	156,3	156,3	40	AT	ST	OC	GM	AE			
27	MIROC-ESM	312,5	312,5	38	AT	ST	OC	GM	AE		CT	BO
28	MIROC-ESM-CHEM	312,5	312,5	80	AT	ST	OC	GM	AE	QA	CT	BO
29	MPI-ESM-LR	208,4	208,4	47	AT	ST	OC	GM			CT	BO
30	MPI-ESM-MR	208,4	208,4	95	AT	ST	OC	GM			CT	BO
31	MRI-CGCM3	125,0	125,0	48	AT	ST	OC	GM	AE			
32	NorESM1-M	277,8	208,4	26	AT	ST	OC	GM	AE	QA		

Fonte: Informações obtidas através dos dados dos modelos do CMIP5 e de Flato *et al.* (2013).

**Tabela 3** - Modelos climáticos regionais. A coluna “Modelo” é a denominação dada aqui para a simulação do MCR. MCG aninhado indica o modelo global que teve dados aplicados *downscaling*. Os domínios são aqueles estabelecidos no projeto CORDEX.

N	Modelo	MCR	V	MCG aninhado	Simulação	Domínio	Instituto/Organização
33	RCA4-Had	RCA4	1	HadGEM2-ES	r1i1p1	CAM44i	Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Ros-sby Centre (SMHI)
34	RCA4-MPI	RCA4	1	MPI-ESM-LR	r1i1p1	CAM44i	
35	RCA4-EC	RCA4	3	EC-EARTH	r12i1p1	SAM44i	
36	RAMS-CAM	RAMS	6	HadGEM2-ES	r1i1p1	CAM44i	Universidade Estadual do Ceará (UECE)
37	RAMS-SAM	RAMS	6	HadGEM2-ES	r1i1p1	SAM44i	

dispersão uma da outra. Camargo e Sentelhas (1997) propuseram uma interpretação do IC criando uma classificação de confiança, mostrada na tabela seguinte.

Os campos médios são estudados com o diagrama proposto por Taylor (2001). Esse diagrama relaciona as métricas espaciais COP, raiz do erro quadrático médio (RMS), e desvio padrão, de forma que facilita a distinção dos resultados, para o qual se tem um ponto de referência para essas três métricas que indica o melhor resultado.

#### 2.4. Projeções futuras

Nas simulações para os cenários RCPs são especificadas as respectivas forçantes radiativas dos cenários. Esses cenários futuros incluem condições dependentes do tempo, para emissões e concentrações de todo o conjunto de GEEs, aerossóis e gases quimicamente ativos, bem como uso e cobertura da terra. Promovendo estimativas de mudanças climáticas futuras por ações antrópicas através das projeções desses diferentes cenários (Taylor *et al.*, 2012).

As projeções de mudanças climáticas futuras, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, são dadas comparando as simulações do período histórico e as idealizadas com os RCPs. As análises são focadas no período do final do século XXI (*time-slice* - como indicado em Taylor *et al.* (2012), e adotado no AR5), dito como longo prazo (*Long*, Dezembro/2079-Novembro/2099) para o cenário RCP85. Todavia, são abordadas análises do clima futuro dos dois RCPs para século 21, observando o comportamento das variáveis no passar dos anos. O período de referência será Dezembro/1985-Novembro/2005 do período histórico, no qual as simulações do clima presente são avaliadas.

As mudanças climatológicas nos regimes de chuvas, temperaturas, e evapotranspiração potencial são analisadas com ciclos anuais para o NEB. Os padrões espaciais por sua vez são discutidos com os campos médios para o período em estudo.

O cálculo de índices climáticos para o NEB é de suma importância nesse contexto. O Índice de Aridez compõe as análises das projeções nos cenários RCPs, onde são apresentados os valores anuais, média para o longo prazo, e os campos médios assim como para as outras variáveis.

### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1. Temperatura do ar próximo à superfície (2 m)

##### 3.1.1. Simulações do clima presente

A climatologia histórica de temperatura do NEB, mostrada na Fig. 2, contém a climatologia observada do CRU, e as modeladas pelos MCGs do CMIP5 (Tabela 2), modelos regionais do CORDEX e RAMS (Tabela 3) para o período histórico.

Como citado por Kayano e Andreoli (2009), a temperatura tem variação anual entre 20 e 28 °C sobre o NEB. Na Fig. 2, o dado observado mostra variação no ciclo anual en-

**Tabela 4** - Classificação do índice de confiança IC segundo Camargo e Sentelhas (1997).

IC	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Tolerável
0,41 a 0,50	Ruim
≤ 0 40	Péssimo

Fonte: Adaptada de Camargo e Sentelhas (1997).

tre 24,3 e 26,7 °C, com valores mais elevados de setembro a dezembro, e mais baixos entre maio e setembro.

O padrão de variação anual do NEB para a temperatura (Fig. 2) é capturado pela maioria dos modelos. O ciclo anual de maior parte dos modelos se apresenta próximo da observação, com apenas alguns modelos simulando valores fora do conjunto.

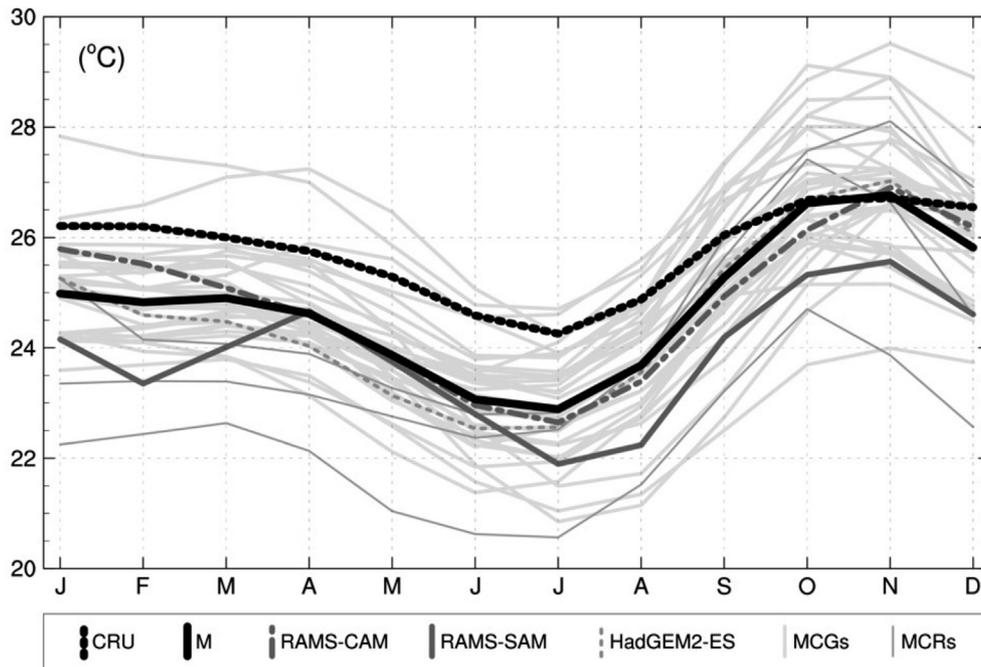
A média dos modelos (M) e o CRU apresentam certa proximidade quanto à temperatura, de forma que a diferença entre os valores dos ciclos anuais tem variação entre -1,5 e 0,5 °C, com M subestimando o CRU durante quase todo o ano e superestimando em pouco novembro. Dentre os resultados simulados para o clima presente da Fig. 2, M apresenta erros relativamente baixos, com viés de -1 °C, EQM de 1,1 °C, e EAM de 1 °C.

Em geral os modelos mostram boa representação das médias climatológicas sobre o NEB. O viés é pequeno para a maioria dos modelos, com alguns apresentando erros maiores como o modelo global *inmcm4* e o regional *RCA4-EC*. As duas simulações do RAMS mostram padrões parecidos a M e ao *HadGEM2-ES* - que condicionou o *downscaling*. O RAMS-SAM tem mais dificuldade que o RAMS-CAM para a temperatura, com aproximadamente o dobro de viés (-1,9 °C/-0,9 °C), EQM (2 °C/1.1 °C) e EAM (1,9 °C/1 °C), subestimando bastante fevereiro (Fig. 2).

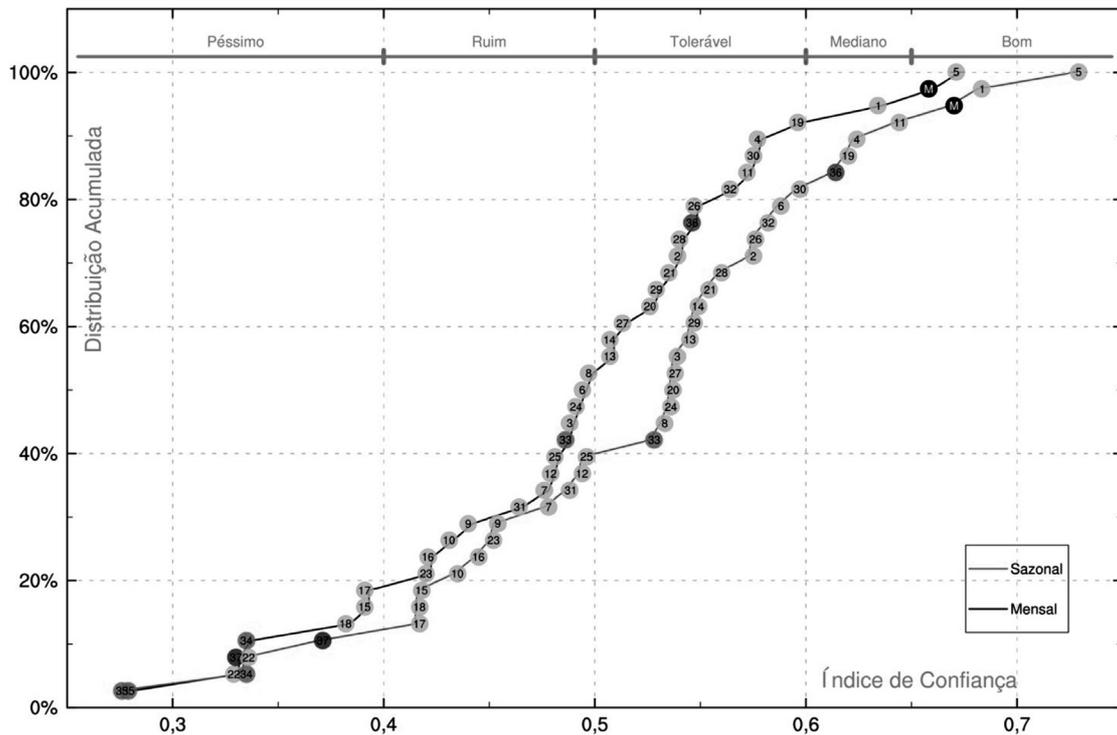
Na Fig. 3 são mostradas as distribuições acumuladas do IC (índice de confiança) de Camargo e Sentelhas (1997), para as séries mensais e sazonais da média de temperatura do NEB. A média dos modelos M, composta pelos 32 MCGs e 5 MCRs, mostra para os dois casos do IC (mensal e sazonal) resultados superiores a maioria dos modelos, sendo superada apenas por MCGs com melhor performance.

Para quase 50% dos modelos se tem médias mensais de temperatura do NEB classificada como tolerável, e 60% no caso da série sazonal. A M e o modelo *BNU-ESM* (5) são os únicos classificados com IC mensal e sazonal bom, e outros 5 (1, 4, 11, 19, *RAMS-CAM*) dentro do intervalo de IC mediano (Fig. 3).

Os resultados do *RCA4-Had* tem melhor desempenho dentre os três *downscaling* do *RCA4*, tendo IC sazonal tolerável e mensal igual a 0,49. O *RAMS-SAM*, o *RCA4-*



**Figura 2** - Climatologia histórica de temperatura do NEB. Representação climatológica de 1985 a 2005. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior. M é a média dos resultados dos modelos globais e regionais.



**Figura 3** - Distribuição acumulada do índice de confiança da temperatura mensal e sazonal do NEB em relação ao CRU. Série de 1985 a 2005. Os nomes dos modelos são dados nas Tabelas 2 e 3.

MPI e o RCA4-EC fazem parte do grupo de 15% dos modelos que mostram resultados menos confiáveis, classificados com IC mensal e sazonal péssimo. Esses regionais com resultados com IC péssimo não possuem valores de

correlação das séries mensais e sazonais tão baixos, para o caso mensal, na sequência que eles foram citados os valores de COT são de 0,65, 0,63 e 0,78, e no caso sazonal ainda maiores: 0,7, 0,64 e 0,8.

Dentre os 32 MCGs tem-se apenas o *inmcm4* (22) com IC sazonal péssimo. O *GISS-E2-R-CC* (18), *GISS-E2-H* (15) e *GISS-E2-R* (17) junto ao *inmcm4* formam o grupo de 20% dos MCGs com valores de IC mensal péssimo, que somando aos 12 com IC mensal ruim perfazem 50% dos MCGs.

O campo da média anual de 1985-2005 de *M* mostrado na Fig. 4 apresenta bastante semelhança ao *CRU*. A média dos modelos tem campo de temperatura suavizado, representando os aspectos gerais vistos no *CRU*, como esperado para uma média.

As diferenças entre *M* e *CRU* apresentam viés pequeno em maior parte da região de estudo (Fig. 4), onde *M* superestima alguns pontos do campo da temperatura, e indica valores subestimados em cerca de 2 °C no centro do Piauí e região da divisa do Ceará e Rio Grande do Norte.

O conjunto das simulações consegue capturar com certa destreza a variabilidade espacial da temperatura média histórica, no diagrama de Taylor da Fig. 5 se observa o conjunto próximo da linha de referência, que diz o acerto quanto ao desvio padrão.

Os modelos regionais *RAMS-CAM* (36) e *RCA4-Had* (33) são os que apresentam a melhor representação espacial da média histórica de temperatura, a correlação é de aproximadamente 0,95, a raiz do erro quadrático médio (RMS) com 0,49 °C (36) e 0,41 °C (33), e desvio padrão bem próximo ao do *CRU*.

Os MCRs são os melhor correlacionados com o *CRU* ao campo de temperatura média histórica, todos no setor de correlação espacial de 0,9 acima (Fig. 5). Os MCGs ocupam posições de correlação desde bem próximas aos regionais até 0,64 - onde se encontra o *BNU-ESM* (5), que também tem o menor desvio padrão do conjunto.

A média de temperatura para o clima presente (1985-2005) observada é de 25,8 °C. Dentre os modelos analisados, os MCGs 4, 1, 28, 6, 27, 3, 8, 11, e 9 são os que tem

média mais próxima (nessa ordem) ao *CRU*, no intervalo de  $\pm 0,5$  °C.

A *M* tem média de temperatura histórica sobre o *NEB* exatamente 1 °C abaixo do *CRU*, fazendo parte do grupo de modelo dentro do intervalo de  $\pm 1$  °C, que contém também o *RAMS-CAM* com o mesmo viés frio, o *RCA4-Had* e outros 3 MCGs. Com erro da média dentro do intervalo de  $\pm 2$  °C se tem 20 modelos, e o *RCA4-EC*, o *inmcm4* e o *CNRM-CM5* mais frios que os demais.

### 3.1.2. Simulações do clima futuro

Os resultados das simulações de temperatura do clima futuro do *NEB* são apresentados a seguir. As médias anuais mostram aumento durante todo o passar do século XXI para os cenários *RCP4.5* e *RCP8.5*.

Como fisicamente esperado, o *RCP8.5* mostra mais aquecimento sobre o *NEB* que o *RCP4.5*. Os modelos concordam em geral, com alguns apresentando valores abaixo do conjunto, característica que se verifica na análise do clima histórico. O *RAMS* seguiu próximo do *HadGEM2-ES* e da própria *M*, embora com valores anuais com anomalia mais acentuada. Nas séries das médias anuais históricas é possível ver padrões parecidos entre o *CRU* e as simulações com o *RAMS* (Fig. 6), com *M* mostrando variações mais tímidas, mas apresentando variabilidade anual no mesmo sentido.

Na Fig. 6 a média das simulações no *RCP8.5* (*M8.5*) finda o período *Long* (até 2099) com temperatura anual de 29,1 °C, 4,1 °C a mais que o último ano do experimento *Historical* (até 2005). Para a média do conjunto no *RCP4.5* (*M4.5*), a temperatura média de 2099 é 26,8 °C, 1,8 °C a mais que 2005 no *Historical*.

As médias climatológicas são projetadas para mudar de setembro a dezembro em maior grau que nos outros meses, com aumento da temperatura durante todo o ciclo em todos os casos analisados. A *M4.5* se mostra mais suave

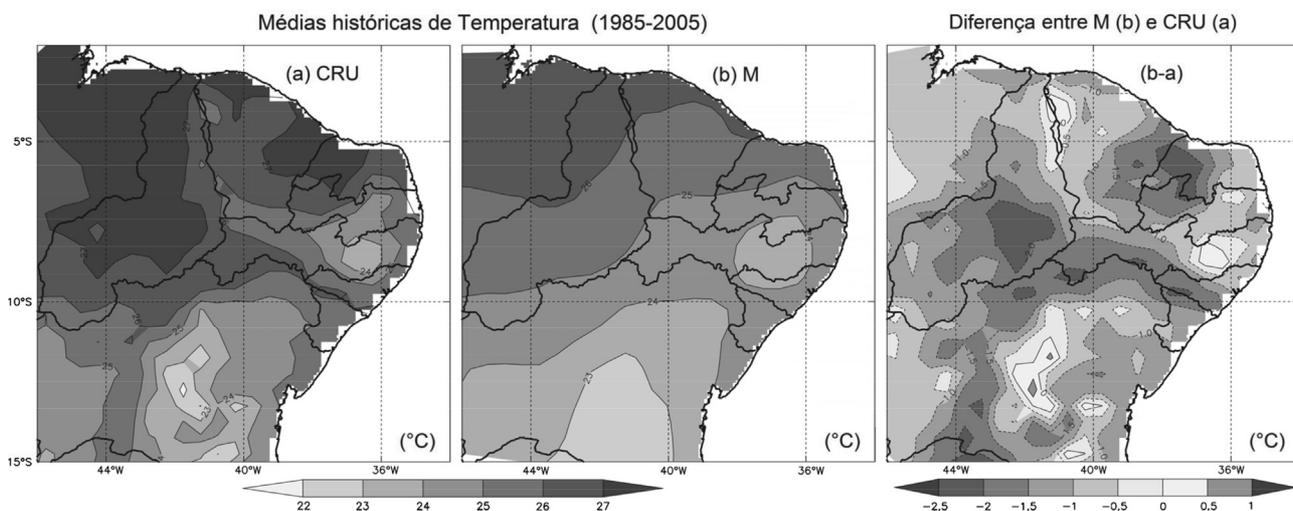
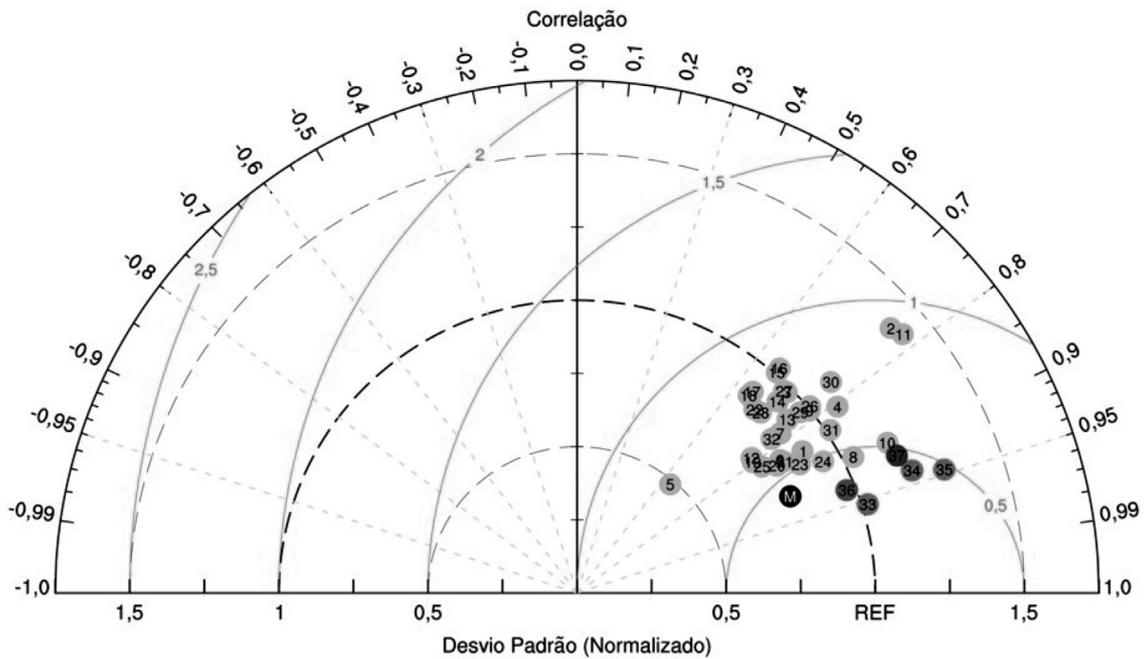


Figura 4 - Campo da média anual de 1985-2005 de temperatura para o NEB do *CRU* e de *M*. O quadro (b-a) é a diferença entre *M* e o *CRU*.

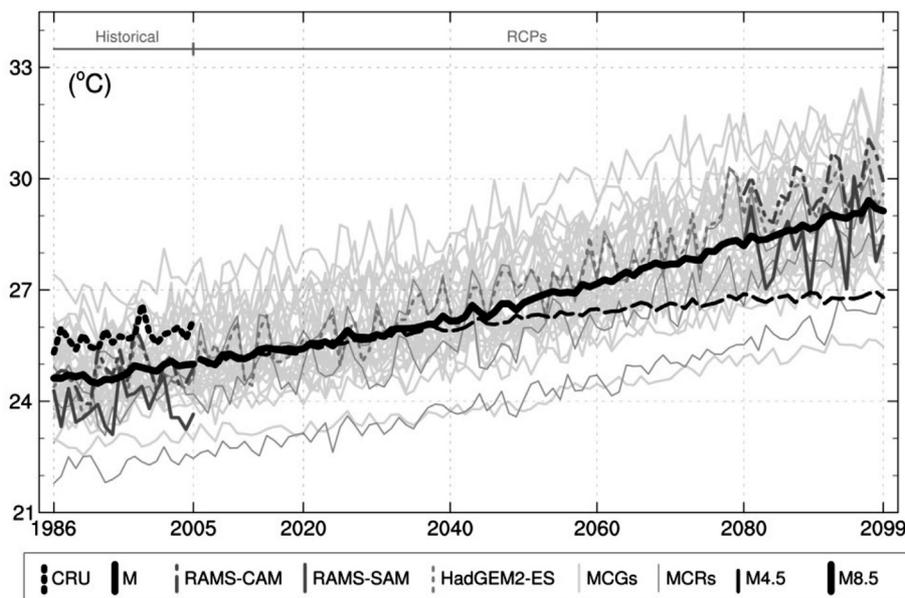


**Figura 5** - Diagrama de Taylor da média histórica de temperatura do NEB. Os eixos vertical e horizontal representam o desvio padrão, e as linhas circulares centradas no ponto REF representam a RMS, normalizados pela divisão ao desvio padrão da observação.

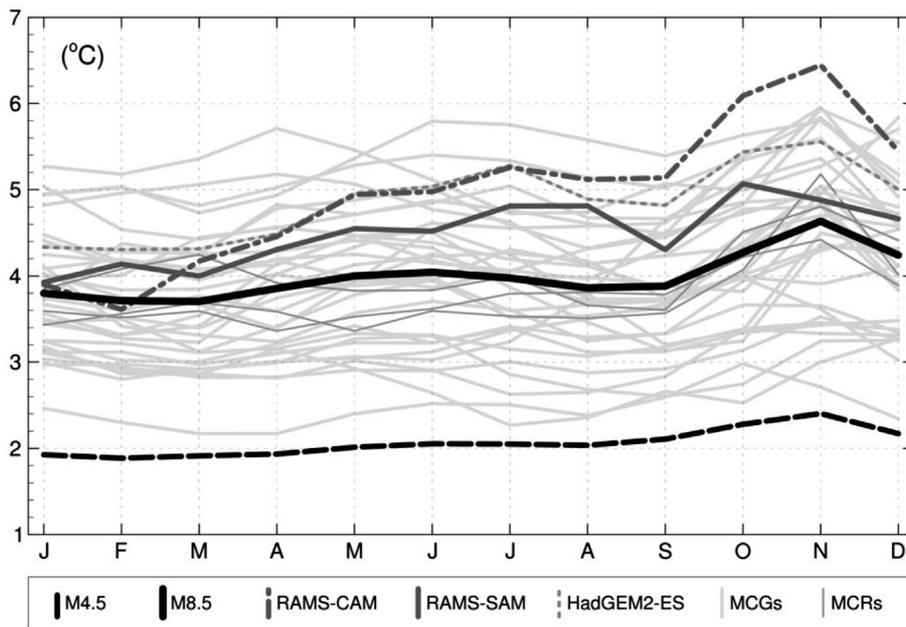
nas diferenças que a M8.5, mas ambos os casos tem-se o mesmo padrão, diferindo apenas no valor de aumento de temperatura (Fig. 7).

O RAMS, CAM e SAM, aponta padrão de mudança do ciclo anual parecido à M8.5, mas com valores mais elevados. O RAMS-SAM comporta-se de forma mais variada, com aumento expressivo no período frio do ciclo (maio a setembro), e menos acentuado que o RAMS-CAM no período quente (setembro a dezembro).

As mudanças no campo de temperatura são de aumento de 3 a 4,6 °C no RCP8.5 Long, de forma gradual da costa ao interior do continente para M, como visto na Fig. 8. A área próxima da costa leste do NEB tem projeção na média das simulações para aumentar por volta de 3,2 °C, enquanto a parte mais oeste entre 5° S e 15° S da região de estudo tem os valores de temperatura projetados para maiores aumentos, chegando aos 4,6 °C a mais.



**Figura 6** - Médias anuais de temperatura do NEB. O experimento *Historical* é dado de 1986 a 2005, e os RCPs de 2006 a 2099. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior. Com exceção de M4.5 (M no RCP4.5), as médias de 2006-2099 são para o RCP8.5.



**Figura 7** - Diferenças das climatologias futura (2079-2099) e histórica (1985-2005) para a temperatura do NEB. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior.

Alguns modelos projetam mudança na temperatura média do NEB para longo prazo em torno do dobro de aumento para o RCP8.5 em relação ao RCP4.5. A M segue essa linha, com aquecimento de 2,1 e 4 °C no RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. No cenário de maiores emissões 50% dos modelos projetam aumento maior que 4 °C, sendo o IPSL-CM5A-MR (24) o modelo com maior valor de diferença futura, +5,3 °C (Fig. 9).

O RAMS se encontra no grupo dos 30% com maior aumento, o RAMS-CAM é o 4º modelo mais quente do

RCP8.5, projetando +4,96 °C, enquanto a simulação do domínio da América do Sul, que no clima presente tem viés mais frio que o RAMS-CAM, apresenta mudança para a média futura de +4,5 °C em relação a sua média no *Historical* (Fig. 9).

### 3.2. Precipitação

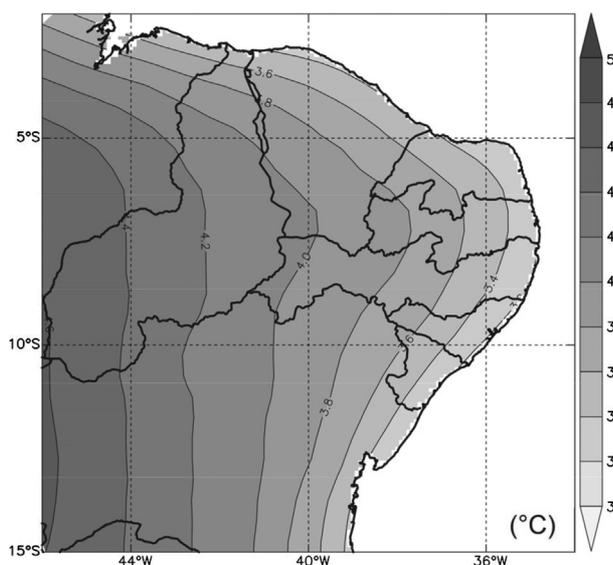
#### 3.2.1. Simulações do clima presente

A climatologia histórica do NEB, assim como estudado por Strang (1972), Kayano e Andreoli (2009), Alvares *et al.* (2013), e outros autores, apresenta maior porcentagem de precipitação entre os meses de novembro e julho, e valores mais baixos entre julho e setembro. Na Fig. 10, que mostra o ciclo anual de 1985-2005, essas características são representadas pelo CRU e pelos modelos em geral.

A representação modelada das climatologias da Fig. 10 segue os padrões observados, com alguns modelos com mais dificuldade em quantificar o ciclo anual. A M consegue representar melhor a precipitação mensal média nos meses do período seco do NEB (julho a novembro), enquanto superestima os meses mais chuvosos, com valores superiores de dezembro a maio, em relação ao CRU.

Os modelos, por sua vez, têm valores do ciclo anual de precipitação bastante variados em relação à observação, alguns muito chuvosos, superestimando todo o ciclo, e outros com perspectiva contrária, se mostrando mais secos. A maioria deles tende a simular mais precipitação no período chuvoso, e menos no período seco, quando comparados ao CRU, o que se reflete em M.

A M tem valores dos meses de agosto a outubro quase iguais ao CRU, mas como muitos modelos que



**Figura 8** - Campo de diferença da média anual do RCP8.5 Long (2079-2099) e Historical (1985-2005) de temperatura para o NEB para média das simulações.

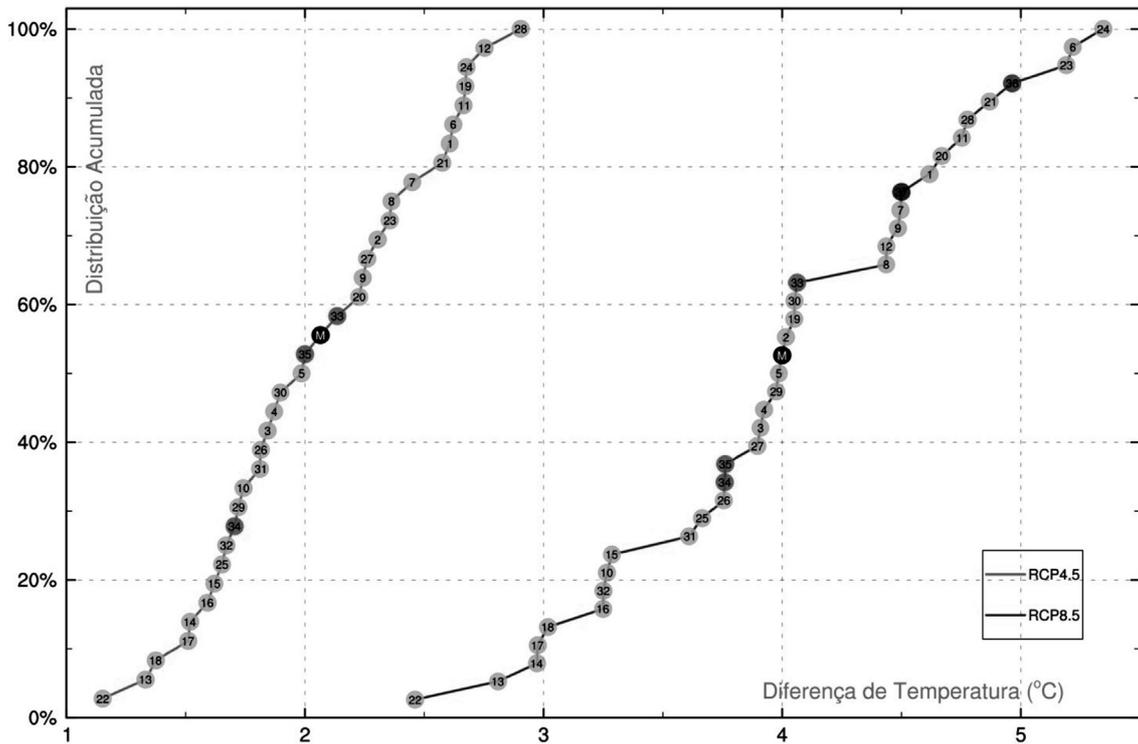


Figura 9 - Distribuição acumulada das diferenças das médias de temperatura do NEB entre os RCPs (2079-2099) e *Historical* (1985-2005).

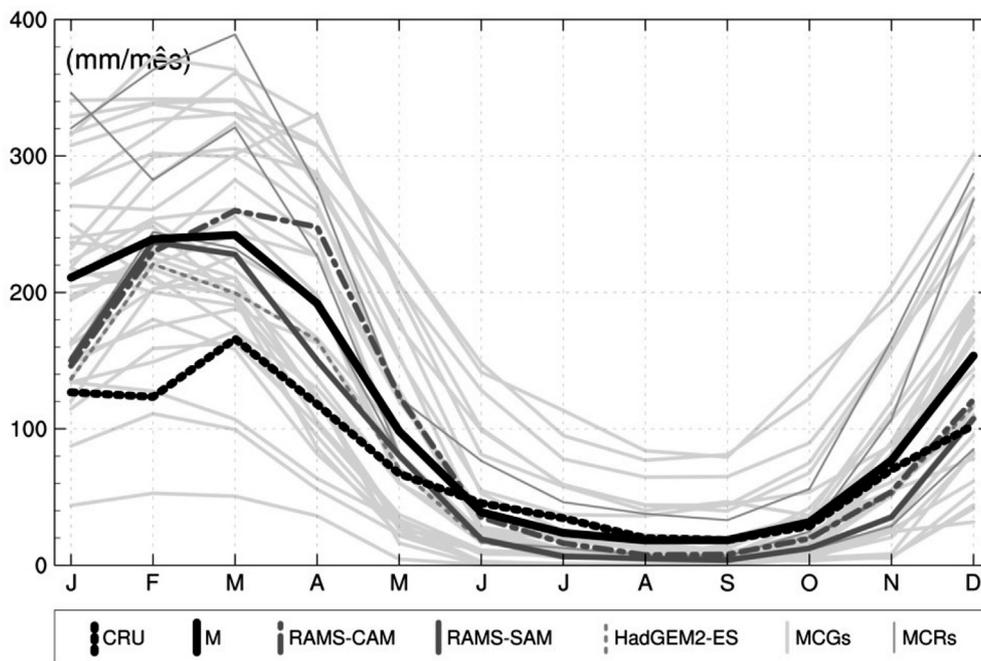


Figura 10 - Climatologia histórica de precipitação do NEB. Representação climatológica de 1985 a 2005. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior. M é a média dos resultados dos modelos globais e regionais. Os valores são em mm/mês (milímetros por mês).

compõem M apresentam viés úmido na estação chuvosa, em fevereiro se tem a maior diferença dos meses do ciclo em relação ao CRU, com 115,7 mm/mês a mais. Esse padrão de chuva de M resulta em viés no ciclo anual

27,5% mais úmido que o CRU, EQM de 54,4 mm/mês, e EAM de 38,4 mm/mês.

Para as médias mensais de precipitação do NEB a M é quem melhor representa a série observada, tendo IC mediano. Já para as séries sazonais M é o quarto melhor resultado,

com IC classificado como bom. O RCA4-Had, o RAMS-SAM, e os MCGs 14, 21, 23, 6, 24 e 5 (melhor IC sazonal), são os que juntamente com M perfazem o grupo dos modelos com IC bom para a precipitação sazonal do NEB (Fig. 11).

Assim como para a temperatura, as médias sazonais de precipitação modelada apresentam maior confiança que as médias mensais, para as duas variáveis se verifica IC sazonal superior ao mensal (Figs. 3-11).

Os resultados com IC ruim ou péssimo não são maioria, as médias mensais de precipitação do NEB com IC tolerável são verificadas em 19 modelos, enquanto 13 têm IC ruim, e apenas 5 modelos classificados com confiança péssima. Para o IC sazonal da precipitação o GISS-E2-H (15) e GISS-E2-H (16) são os únicos com IC abaixo de 0,4, com outros 7 modelos com representação ruim, cerca de 30% dentro da classe tolerável, e os demais 40% com séries sazonais representadas de forma mediana ou boa (Fig. 11).

Dos MCRs o RCA4-Had é o que melhor representou as médias mensais e sazonais de precipitação do NEB, seguido do RAMS-SAM. No caso do IC mensal, o RAMS-CAM, RCA4-MPI e RCA4-EC são classificados como ruins. No caso sazonal a *downscaling* do EC-EARTH está na classe de confiança ruim, com o RCA4-MPI junto aos modelos com IC tolerável, e o RAMS-CAM no grupo de confiança mediana.

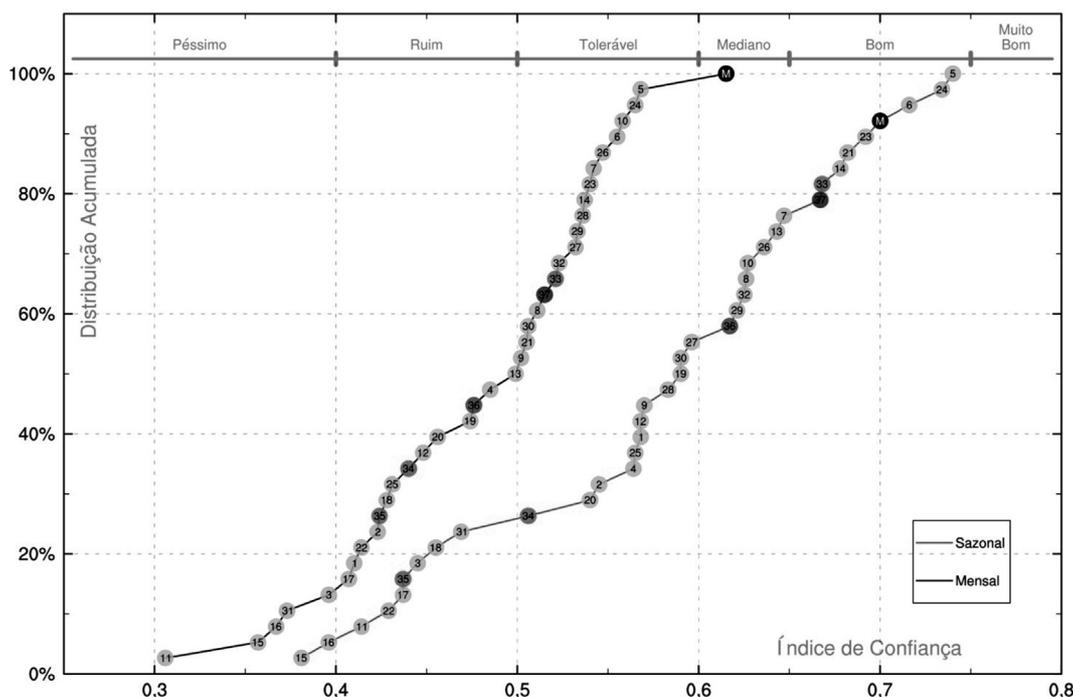
O campo da média anual de 1985-2005 de precipitação de M mostrado na Fig. 12 apresenta padrões não tão próximos ao CRU, mas com os mesmos aspectos gerais. A

média dos modelos tem campo de precipitação mais chuvoso na parte norte do NEB que o CRU, superestimando a precipitação em maior parte da região analisada.

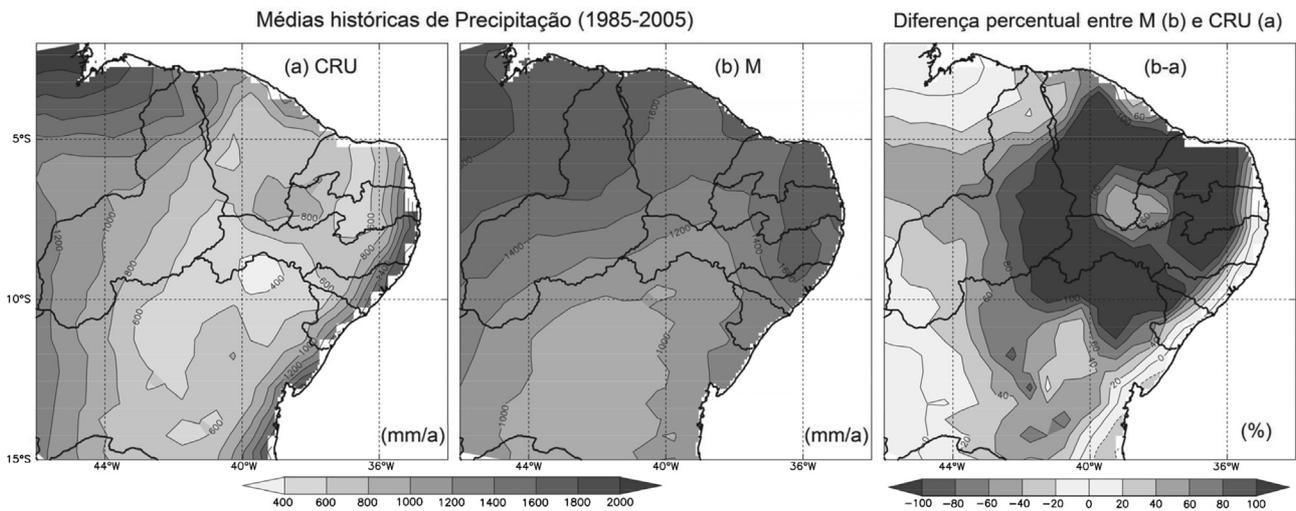
O campo histórico observado de precipitação é difícil de representar tanto para os modelos de grande escala, quanto para os regionais, no diagrama de Taylor da Fig. 13 se observa essa característica, com a maioria dos modelos com correlação espacial abaixo de 0,6, alguns realmente incapazes de representar a média histórica apresentando valores negativos de correlação ou próximos de zero.

O RAMS-SAM e o CanESM2 (6) são os que apresentam a melhor correlação espacial da média histórica de precipitação, 0,71 e 0,7 respectivamente. O RAMS-SAM mesmo com a melhor correlação apresenta raiz do erro quadrático médio (RMS) de 586,5 mm/a, ligeiramente maior que o verificado para o RAMS-CAM (574,4 mm/a), e desvio padrão o dobro do CRU. Nos dois *downscaling* do RAMS se têm valores de correlação superior ao HadGEM2-ES e à maioria dos modelos, sendo os dados de precipitação RAMS melhor correlacionado ao CRU para o campo da média histórica do NEB que o demais dados de *downscaling* analisados, mesmo com desvios da média não tão pequenos (Fig. 13).

A média dos modelos dá uma boa estimativa do campo histórico de precipitação em relação conjunto, com desvio padrão bem próximo ao do CRU e um dos menores valores de RMS, estando no grupo de modelos em que a RMS normalizada é menor que 1 - composto apenas por MCGs, enquanto a maior porcentagem dos modelos têm RMS normalizado entre 1 e 1,5.



**Figura 11** - Distribuição acumulada do índice de confiança da precipitação mensal e sazonal do NEB em relação ao CRU. Série de 1985 a 2005. Os nomes dos modelos são dados nas Tabelas 2 e 3.



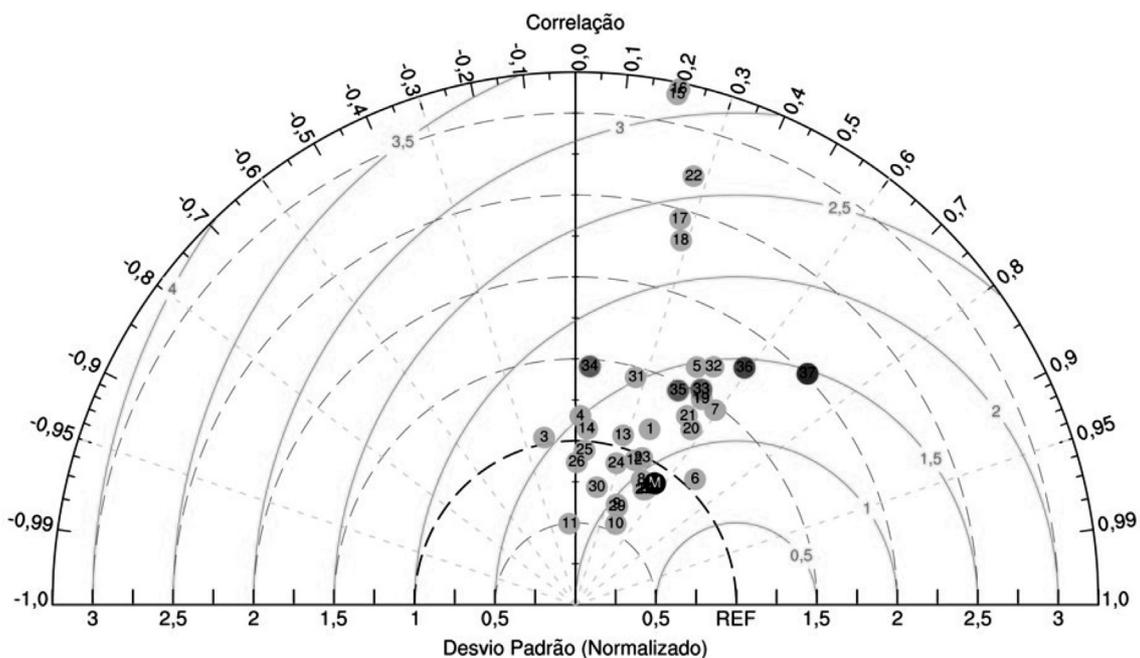
**Figura 12** - Campo da média anual de 1985-2005 de precipitação para o NEB do CRU e de M. O quadro (b-a) é a diferença percentual entre M e o CRU. As médias são dadas em mm/a (milímetros por ano).

A média de precipitação observada para o período histórico (1985-2005) é de 921 mm/a. Dentre os modelos analisados, o MCG de melhor resolução do conjunto, CMCC-CM, é quem simula a média mais próxima do CRU, errando apenas em 17 mm/a, sendo o único modelo no intervalo de  $\pm 50$  mm/a do observado.

Os MCGs (em relação à MCRs) são os com médias de precipitação histórica mais próximas do CRU, 5 dentro do intervalo de viés de  $\pm 100$  mm/a - apenas o HadGEM2-CC subestimando, 6 no intervalo de  $\pm 200$  mm/a - contendo também o RAMS-SAM (+114 mm) e o RCA4-Had

(+136 mm), e os 4 que compõem o grupo com viés no intervalo de  $\pm 300$  mm/a.

A M tem média de precipitação histórica sobre o NEB de 1344 mm/a, apresentando viés chuvoso de +423 mm/a em relação à média observada, sendo 46% mais úmida. M tem valor da média histórica no grupo dos modelos mais chuvosos, que conta com 16 modelos com viés acima de 300 mm/a, com o RAMS-CAM tendo o menor viés desse grupo (+349 mm).



**Figura 13** - Diagrama de Taylor da média histórica de precipitação do NEB. Os eixos vertical e horizontal representam o desvio padrão, e as linhas circulares centradas no ponto REF representam a RMS, normalizados pela divisão ao desvio padrão da observação.

3.2.2. Simulações do clima futuro

Os resultados das simulações de precipitação do clima futuro do NEB são mostrados a seguir. As médias anuais de M não apresentam aumento ou diminuição expressivos durante todo o passar do século XXI, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, observando-se simulações futuras bastante distribuídas, para mais e para menos chuvas, dentre os modelos (Fig. 14).

Segundo o AR5, a simulação de padrões de grande escala de precipitação melhorou um pouco desde o AR4, mas os modelos continuam a representar a precipitação de forma não tão boa quanto para a temperatura. A correlação entre o padrão espacial de grande escala da precipitação média anual modelada e observado aumentou de 0,77 para os modelos disponíveis no momento do AR4 para 0,82 para os modelos atuais (CMIP5). É dito ainda no AR5 que, em escalas regionais a precipitação não é bem simulada pelos MCGs, e a avaliação continua a ser difícil devido às incertezas observacionais (Flato *et al.*, 2013).

O NEB é uma região que experimenta variabilidade climática regida por vários sistemas atmosféricos e oceânicos, o que dificulta ainda mais na representação climática da precipitação. Esses fatores regionais tornam difícil um acordo nos resultados das simulações da precipitação, diferente do que é verificado para a temperatura. Isso traduz em incertezas nas projeções, onde até os MCRs mostram distorções (Fig. 14).

O RAMS apresenta médias anuais do NEB no experimento *Historical* com variações mais semelhantes ao CRU que M, sempre com resultados próximos do HadGEM2-ES. No final do século XXI, as duas simulações do RAMS

para o cenários de maiores emissões apontam aumento nos totais anuais de precipitação do NEB, simulando valores acima do HadGEM2-ES para os dois domínios de *downscaling*.

Nos dois RCPs analisados a média dos modelos apresenta variações pequenas nas médias anuais, com valores bem parecidos durante todo o período de estudo do clima futuro (Fig. 14).

As médias climatológicas da precipitação são projetadas para mudar nas duas estações (chuvosa e seca) do NEB, com concordância de quase todos os modelos para diminuição nos meses menos chuvosos (Fig. 15).

A M tem aumento projetado nos três primeiros meses do ano, com valores em torno de 15% maiores nos RCPs que no *Historical*, com aumento maior no RCP8.5 (Fig. 15). Nos demais meses, agosto a dezembro, M segue esse padrão no sentido contrario, com redução maior no RCP8.5 que no RCP4.5, chegando a -47,5% (-24,6%) em outubro (setembro) no RCP8.5 (RCP4.5).

O RAMS-CAM e RAMS-SAM apontam padrão de mudança do ciclo anual parecido à M (Fig. 15), mas com valores mais elevados. O RAMS-SAM se comporta de forma mais variada, apresentando um dos maiores aumentos percentuais na estação chuvosa do NEB, seguindo o comportamento da projeção similar ao RAM-CAM e o HadGEM2-ES - que são mais secos no futuro.

O RCA4-Had é o modelo que tem aumento percentual expressivo de julho a setembro, alcançando em agosto 129,4% a mais no RCP8.5 que sua simulação do clima presente para a precipitação.

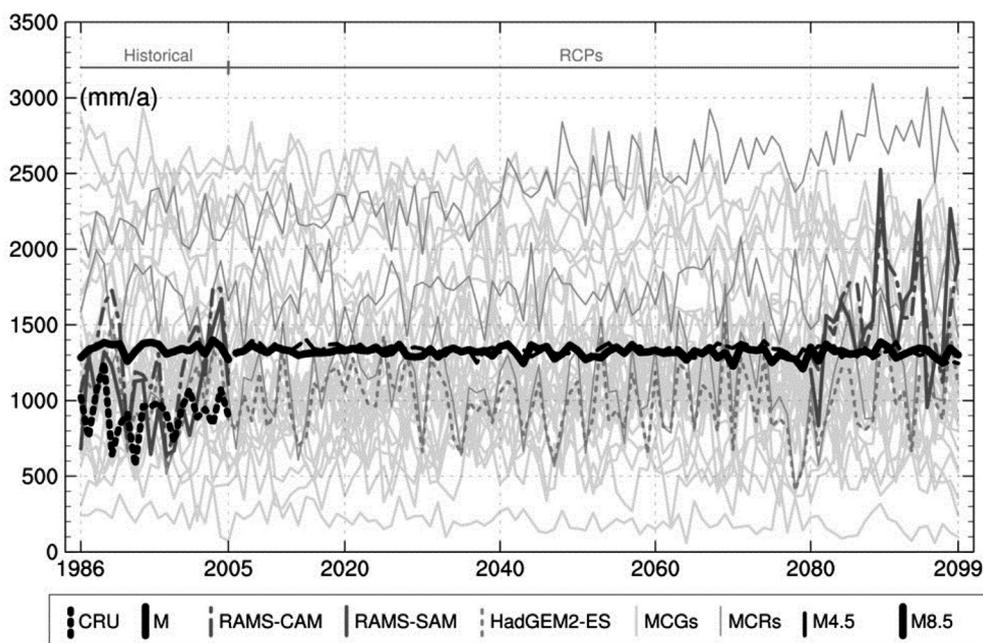
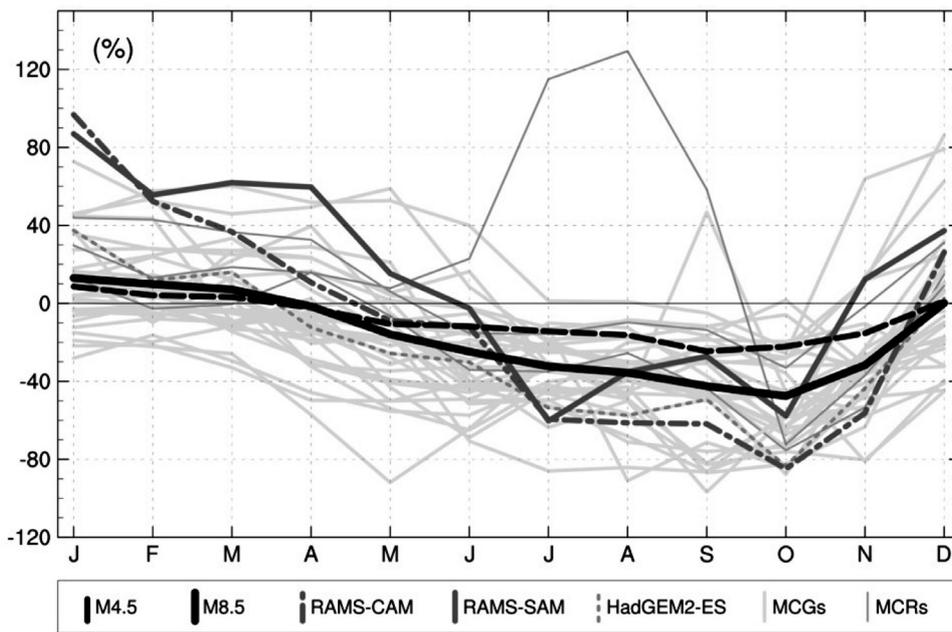


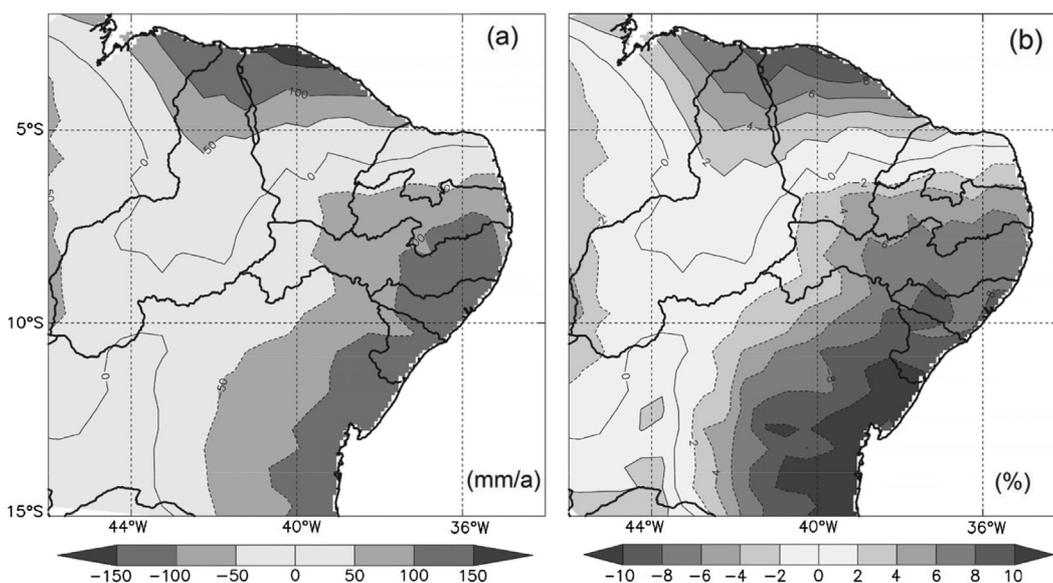
Figura 14 - Médias anuais de precipitação do NEB. O experimento *Historical* é dado de 1986 a 2005, e os RCPs de 2006 a 2099. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior. Com exceção de M4.5 (M no RCP4.5), as médias de 2006-2099 são para o RCP8.5.



**Figura 15** - Diferenças percentuais das climatologias futura (2079-2099) e histórica (1985-2005) para a precipitação do NEB. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior.

As mudanças no campo de precipitação são de aumento de até 200 mm/a na costa norte do NEB, e diminuição mais elevada em maior parte da região centro-leste, de até -100 mm/a no RCP8.5 Long, para M. A área do centro e oeste do NEB são projetadas as menores mudanças, em torno de  $\pm 50$  mm/a. Da Bahia ao Rio Grande do Norte os estados mostram diminuição em quase toda a área dos estados, entre 50 e 100 mm/a, tendo o litoral baiano o maior percentual (mais que 10%) de mudança para menos chuvas na projeção de M no RCP8.5 (Fig. 16).

As mudanças na precipitação média do NEB para longo prazo, assim como nas médias anuais, são bem diversificadas no conjunto, que não mostra concordância evidente como para a temperatura. Têm-se 60% dos modelos apontando para redução na média de precipitação, em que se encontra a M, nos dois cenários futuros de emissões. Para aumento na média de precipitação se tem os outros 40% dos modelos, que conta com a presença de todas as simulações regionais para o RCP8.5, onde a maiores aponta para média até 20%.



**Figura 16** - Campos de diferença (quadro a) e diferença percentual (quadro b) da média anual do RCP8.5 Long (2079-2099) e Historical (1985-2005) de precipitação para o NEB para a média das simulações.

Mesmo com mais modelos apresentando redução na média de precipitação do NEB nas projeções, a média dos modelos nos dois cenários apresenta projeção de mudança muito pequena, -11,3 mm/a (RCP4.5) e -21 mm/a (RCP8.5), já que a distribuição acumulada de probabilidade das diferenças percentuais é quase centrada em zero.

O RAMS projeta aumento percentual de precipitação em longo prazo de +26,3% e +51,7% no RCP8.5, para os domínios CAM e SAM, respectivamente. O RCA4, que tem simulações de *downscaling* para os dois RCPs estudados, só indica redução para o RCA4-MPI no RCP4.5, com as projeções dos seus três representantes no RCP8.5 concordando em aumento de precipitação (Fig. 17).

O IPSL-CM5A-LR (23), IPSL-CM5A-MR (24), e o RAMS-SAM são os modelos com maior percentual de mudança na precipitação, os três apontando para projeções acima de 50% na média futura do NEB, no cenário mais pessimista para o clima futuro (Fig. 17).

### 3.3. Evapotranspiração potencial

#### 3.3.1. Simulações do clima presente

As taxas mensais de evapotranspiração potencial do NEB são mais elevadas de agosto a novembro - meses quentes e secos da climatologia do NEB (Figs. 2-10) -, e com valores mais baixos entre abril e junho - final da estação chuvosa e início do período mais frio do NEB -, com a ETo calculada com os dados do CRU e do NCEP mostrando valores climatológicos com padrão fisicamente esperado, visto no ciclo anual de 1985-2005 na Fig. 18.

Comumente será feita referência a ETo observada como CRU.

A representação da climatologia observada pelos modelos (Fig. 18) é bem simulada para ETo, melhor até que para temperatura, onde a maioria dos modelos mostra bons resultados.

Como os modelos têm seus ciclos anuais distribuídos quase que igualmente acima e abaixo do ciclo do CRU, M tem valores climatológicos de evapotranspiração potencial muito próximos do observado, se mostrando uma boa representante para a variável.

O HadGEM2-ES é um dos MCGs que tem bastante destreza em representar o ciclo anual de ETo do NEB, com resultados mais próximos da observação que os MCRs condicionados por ele - RAMS-CAM, RAMS-SAM e RCA4-Had.

O RAMS faz parte do grupo de modelos mais secos, com valores mensais médios de ETo acima do CRU em quase todos os meses para os dois *downscaling*, tendo o RAMS-SAM valores quase iguais ao observado de julho a setembro. O RAMS-CAM apresenta erros maiores que o RAMS-SAM, com viés de +29,5 mm/mês (21%), EQM de 31,5 mm/mês, e EAM de 29,5 mm/mês. O RAMS-CAM por sua vez mostra mais destreza, com erros de +16,8 (12%), 20 e 17,5 mm/mês de viés, EQM e EAM respectivamente.

Com bom desempenho, a maior diferença entre o ciclo anual de M e do CRU é em janeiro, de apenas -13,3 mm/mês. De maio a julho M tem ETo mensal média prati-

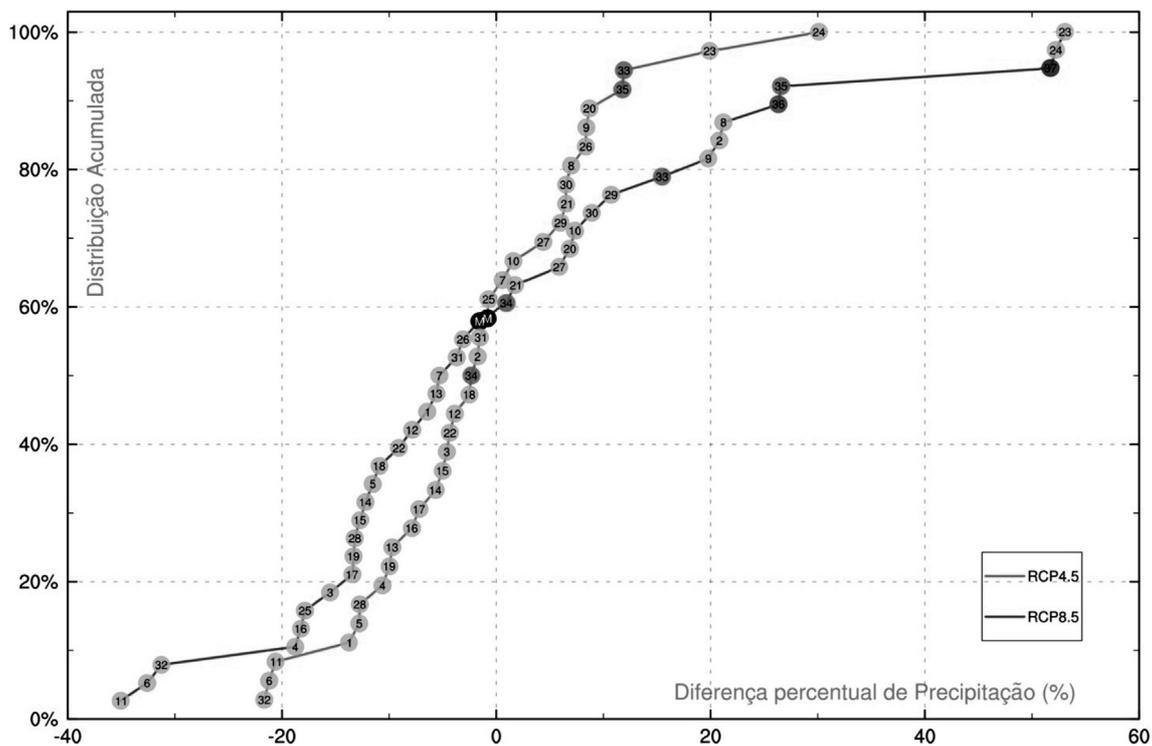
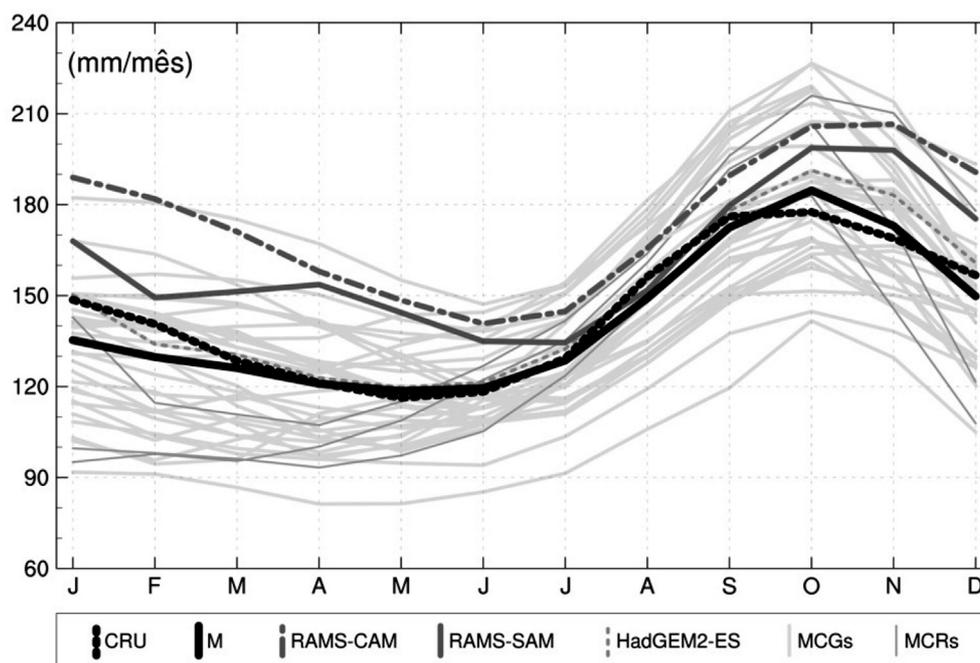


Figura 17 - Distribuição acumulada das diferenças percentuais das médias de precipitação do NEB entre os RCPs (2079-2099) e Historical (1985-2005).



**Figura 18** - Climatologia histórica de evapotranspiração potencial do NEB. Representação climatológica de 1985 a 2005. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior. M é a média dos resultados dos modelos globais e regionais. Os valores são em mm/mês (milímetros por mês).

camente igual ao CRU, errando em no máximo 2,4 mm (em módulo). Tendo isso em vista, M é quem possui os menores erros comparados aos dos modelos, com -2,6 mm/mês (-1,7%) de viés, 6,4 mm/mês de EQM e 5 mm/mês de EAM em relação ao CRU.

Entre MCRs e MCGs, os menores erros na representação das médias do ciclo anual de ETo são dos MCGs, com a maioria deles mostrando EQM e EAM menor que os MCRs. Por outro lado o RCA4-Had (33) tem viés 3,7% (7,1 mm/mês), onde apenas 11 MCGs mostram valores mais próximos de zero.

Para as médias mensais e sazonais de evapotranspiração potencial do NEB, M é quem melhor representa as respectivas séries observadas, tendo IC ótimo - maior grau de confiança da escala de Camargo e Sentelhas (1997). Nessa mesma perspectiva qualitativa de M se tem os MCGs GFDL-ESM2G (13), GFDL-ESM2M (14) e IPSL-CM5B-LR (25), que conseguem representar as médias de ETo do NEB com ótima confiança (Fig. 19).

Por outro lado, para a série mensal de ETo do NEB o RAMS e o MRI-CGCM3 apresentam IC ruim (Fig. 19), que é devido em parte à baixa concordância com o CRU, com eles possuindo COT de 0,75, 0,66, e 0,81, enquanto ICW de 0,65, 0,73, e 0,54, para o RAMS-CAM, RAMS-SAM, e MRI-CGCM3 respectivamente.

Como verificado para a temperatura e precipitação, as médias sazonais de ETo modelada também apresentam maior confiança que as médias mensais, as três variáveis possuindo IC sazonal superior ao mensal para todos os resultados modelados (Figs. 3, 11 e 19). Dessa forma, o

RAMS já mostra confiança tolerável sazonalmente, juntamente com o RCA4-MPI, RCA4-EC, e 6 (9) MCGs para o ETo sazonal (mensal).

A maioria dos modelos consegue reproduzir as médias mensais e sazonais de evapotranspiração potencial do NEB com confiança entre mediana e muito boa, levando M a ter IC ótimo. Dos modelos regionais o RCA4-Had é o que apresenta resultados mais confiáveis, com IC mediano e bom nos casos mensal e sazonal, respectivamente. Deve ser dado destaque a qualidade dos MCGs para as médias de ETo do NEB, 50% deles estão entre bons e muito bons para a representação da série mensal, e 60% nessa mesma qualificação para a série sazonal, visto na Fig. 19.

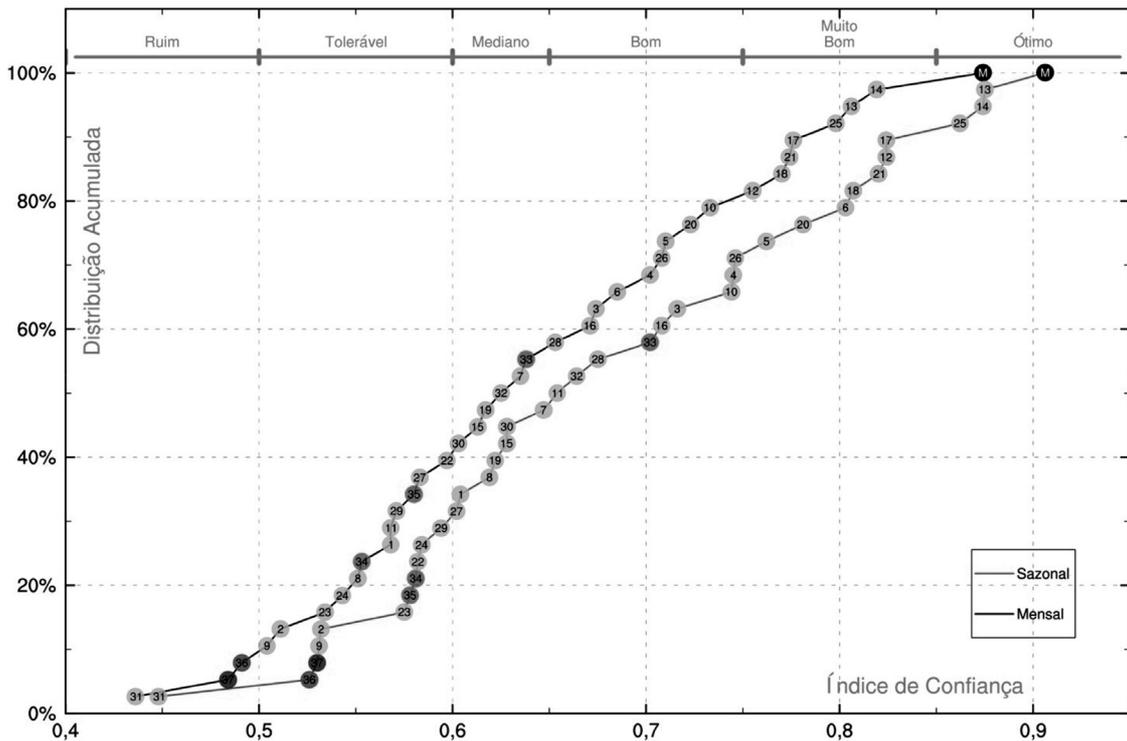
Pelo que já foi analisado até aqui para a ETo do NEB, é de se esperar que o campo da média histórica também seja minimamente bem representado pelos modelos. Na Fig. 20 se tem os campos da média anual de 1985-2005 do CRU e de M, onde a média dos resultados modelados apresenta padrões não tão diferenciados em relação ao CRU.

O campo de ETo observado mostra taxas maiores na região da divisa do Ceará com Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, entre 2000 e 2200 mm/a. Os Estados do Nordeste Setentrional e maior parte da Bahia são os lugares que se verifica taxas acima de 1700 mm/a. Já na parte do Maranhão presente na região de estudo se tem as menores taxas, com predomínio de valores abaixo de 1600 mm/a.

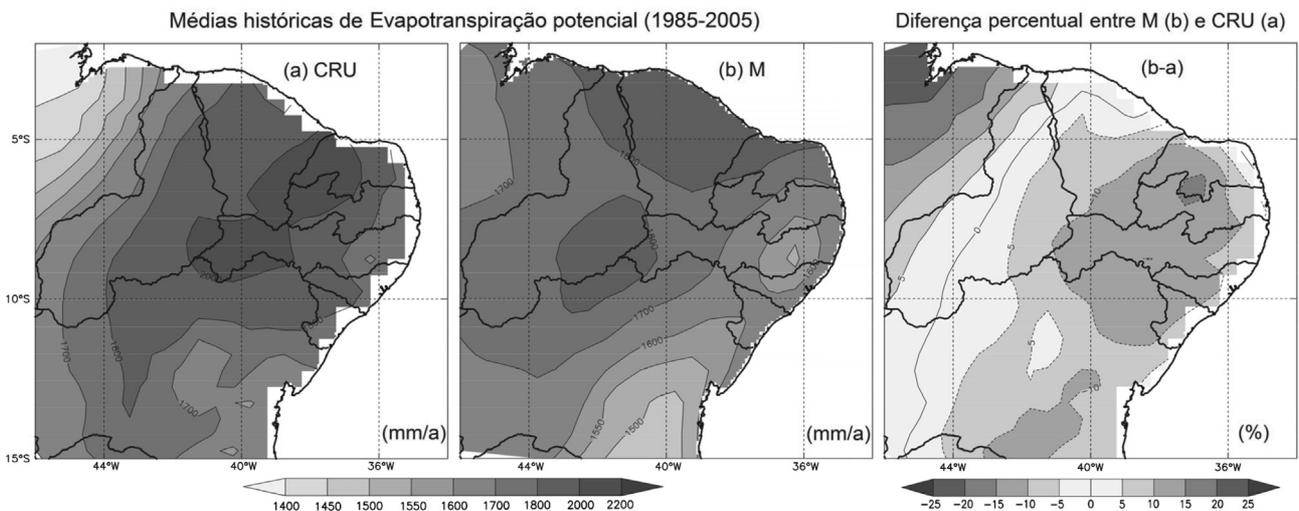
A média dos modelos acerta grande parte da área em que se encontram as maiores taxas do campo de ETo do NEB, mas subestima a região próxima do costa leste, principalmente na Bahia. Na região do Maranhão, em que a

observação tem menores taxas de ETo, M até tem valores mais baixos (em relação as maiores taxas) em uma porção dela, mas superestima em até 15% como mostrado no quadro (b-a) de diferença percentual da Fig. 20. Assim, as diferenças no campo de ETo, entre M e o CRU, se dividem em duas partes, uma com taxas maiores chegando a cerca de +25%, e a outra onde M subestima, com taxas de 5% a 15% menores em quase toda a metade leste da parte continental da região de estudo.

O RAMS-SAM tem bastante semelhança com M para os campos de ETo, cujos valores de correlação espacial da média histórica são bem próximos, mais que o RAMS-CAM, como visto no diagrama de Taylor da Fig. 21. Mesmo com as semelhanças, o RAMS-SAM mostra valores maiores onde se verifica taxas mais elevadas, e valores menores nas áreas que se têm menor potencial de evapotranspiração para M. Esse padrão de distribuição resulta em diferenças percentuais chegando a mais de 30% no Mara-



**Figura 19** - Distribuição acumulada do índice de confiança da evapotranspiração potencial mensal e sazonal do NEB em relação ao CRU. Série de 1985 a 2005. Os nomes dos modelos são dados nas Tabelas 2 e 3.



**Figura 20** - Campo da média anual de 1985-2005 de evapotranspiração potencial para o NEB do CRU e de M. O quadro (b-a) é a diferença percentual entre M e o CRU. As médias são dadas em mm/a (milímetros por ano).

nhão, e no sentido oposto, diferenças de mais que -30% em relação ao CRU no leste da Bahia, que dá ao RAMS-SAM desvio padrão aproximadamente 75% maior que o observado (Fig. 21).

Mesmo com grande parte dos modelos tendo bons resultados climatológicos e IC mensal e sazonal de tolerável a ótimo de ETo, o campo observado foi difícil de ser simulado para muitos modelos, como mostrado no diagrama de Taylor (Fig. 21). O RCA4-MPI e outros 22 MCGs apresentam correlação com o CRU abaixo de 0,3, mas é válido resaltar que o campo médio histórico de ETo para M mostrado na Fig. 20 tem COP de 0,39, pois essa correlação é feita ponto a ponto, para a grade de 0,5° de espaçamento horizontal, resultando no acerto ou erro do campo como um todo, e não apenas de padrões de grande escala exatamente - como visto para M.

No setor de COP entre 0,3 e 0,6, além de M se encontram dois representantes de cada MCR - RCA4-Had (0,39), RCA4-EC (0,42), RAMS-CAM (0,53) e RAMS-SAM (0,37), e os MCGs CSIRO-Mk3-6-0 (0,42), ACCESS1.3 (0,38), CESM1-CAM5 (0,43) e MIROC-ESM (0,56). Dentre esses modelos citados, o CSIRO-Mk3-6-0 é o que tem desvio padrão mais próximo do observado, e o RAMS-SAM o mais distantes, apresentando os maiores erros (RMS) desse grupo (Fig. 21).

Os melhores resultados para o campo da média histórica de ETo são dos MCGs HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, ACCESS1-0, MIROC5, e HadGEM2-ES, nessa ordem. Eles são os que mais se aproximam do CRU, com RMS normalizado menor que 1 (165,8 mm/a), correlação

espacial no setor de 0,6 a 0,8, e desvio padrão dentro do intervalo de  $\pm 25\%$  do desvio do CRU.

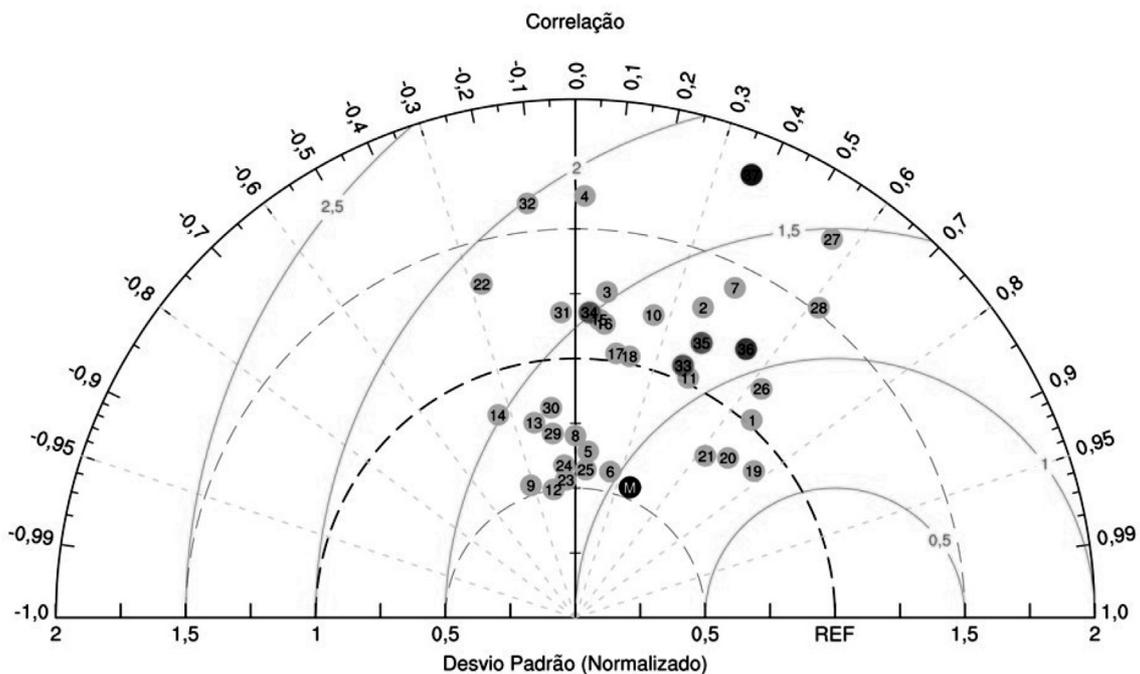
A média de evapotranspiração potencial observada do NEB para o período histórico é de 1738 mm/a. O CSIRO-Mk3-6-0 é o modelo que tem média mais próxima do observado, com diferença de apenas -6 mm/a, liderando o grupo que tem valores médios de ETo dentro do intervalo de  $\pm 50$  mm/a - IPSL-CM5A-MR (-21 mm), IPSL-CM5A-LR (-29 mm), M (-30 mm), HadGEM2-ES (+41 mm), e bcc-csm1-1 (-43 mm).

Para valores de ETo média do NEB de 1985-2005 com erro maior que  $\pm 50$  mm/a se tem: 7 MCGs e o RCA4-Had para até  $\pm 100$  mm/a; 10 MCGs e o RCA4-MPI de  $\pm 100$  a  $\pm 200$  mm/a; 6 MCGs, o RAMS-SAM e o RCA4-EC de  $\pm 200$  a  $\pm 300$  mm/a; e o ACCESS1.3, HadGEM2-AO, inmcm4, MRI-CGCM3, e RAMS-CAM para erros maiores que  $\pm 300$  mm/a.

### 3.3.2. Simulações do clima futuro

As simulações de evapotranspiração potencial para os cenários de emissões de GEEs futuras do NEB são mostrados a seguir. Para todos os modelos se têm concordância de aumento das taxas de ETo em relação à maior forçante radiativa submetida ao sistema climático, similar ao que foi mostrado para temperatura do ar próximo à superfície.

No período histórico as médias anuais de ETo de M são bastante próximas do CRU nos 10 primeiros anos, daí adiante a observação mostra aumento que M não reproduz, com o CRU chegando a 2005 com taxas de evapotranspiração potencial de 1818 mm (Fig. 22).



**Figura 21** - Diagrama de Taylor da média histórica de evapotranspiração potencial do NEB. Os eixos vertical e horizontal representam o desvio padrão, e as linhas circulares centradas no ponto REF representam a RMS, normalizados pela divisão ao desvio padrão da observação.

Os modelos apresentam médias anuais de ETo do NEB não muito espalhadas ou com padrões distintos de aumento ou diminuição, como visto para a precipitação, com os resultados formando um conjunto com aumento com tendência uniforme no passar do século XXI. O MRI-CGCM3 é o único modelo que foge ao conjunto, onde são vistos valores anuais de ETo mais baixos desde o período histórico (Fig. 22).

De 2006 a 2040 M nos dois cenários futuros estudados mostra valores anuais próximos, indicando mudanças de curto-prazo na média anual não muito distante entre os RCP4.5 e RCP8.5. As taxas de ETo do NEB são superiores para M8.5 desde então, chegando a 2099 com potencial de evapotranspiração de 1977,8 mm/a, enquanto no RCP4.5 o valor correspondente é de 1820,8 mm/a.

O RAMS apresenta médias anuais do NEB no experimento *Historical* com variações distintas nos dois resultados de *downscaling*, que superam o HadGEM2-ES - que se mostra mais próximo aos valores do CRU. O RAMS-CAM tem resultados mais elevados de ETo no clima presente que o RAMS-SAM, mas ambos próximos, assim como nas projeções de longo prazo do RCP8.5, em que o RAMS-SAM mostra variações anuais bastante expressivas, enquanto o RAMS-CAM segue o padrão de variação do modelo condicionante, mas com valores mantidos superiores (Fig. 22).

Nas projeções das médias climatológicas da ETo, Fig. 23, se têm para M4.5 e M8.5 aumento percentual maior nos meses de maiores e menores valores de ETo da simu-

lação histórica, seguindo exatamente o padrão de mudança da climatologia de temperatura.

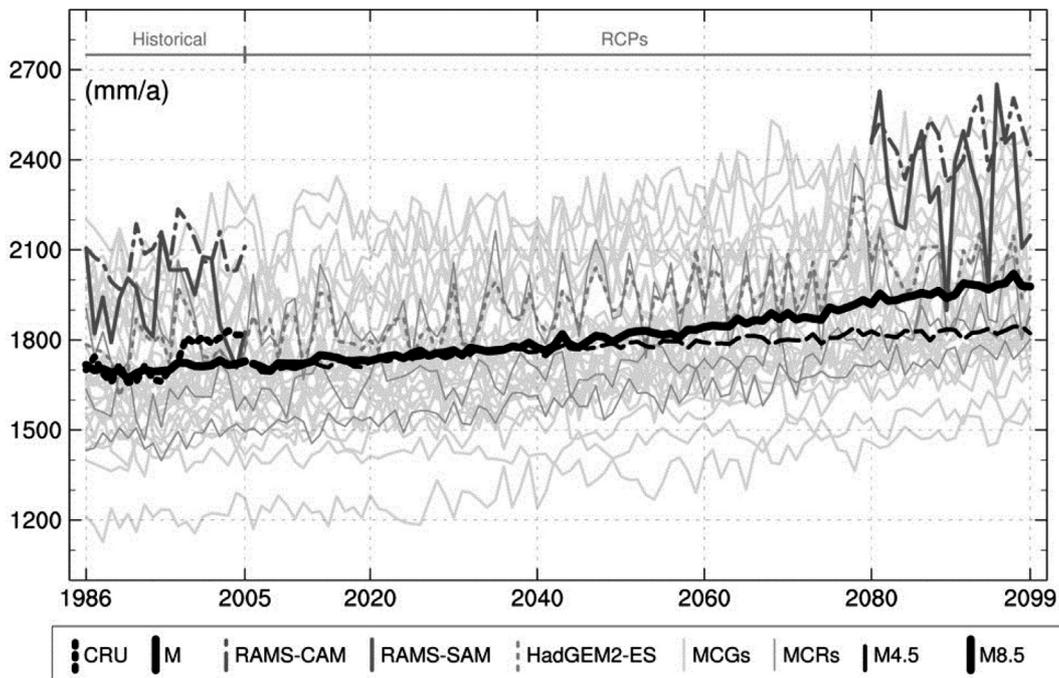
As projeções de mudanças percentuais do ciclo anual de ETo do NEB para o RAMS são similares ao que se tem para M, com o RAMS-CAM mostrando pouco aumento em janeiro e fevereiro, e aumento superior à M de abril a dezembro para ambos os representantes (CAM e SAM).

O padrão de mudança na climatologia não é unânime entre os modelos, alguns mostram diferenças percentuais bem distintas ao conjunto, com é o caso do RCA4-Had, tem aumento maior em fevereiro, março e novembro para o RCP8.5 (Fig. 23). Alguns MCGs apontam aumento mais expressivo de ETo nos meses de abril e maio, e nos demais meses valores concordando com M, destacando o bccsm1-1-m, NorESM1-M, CanESM2.

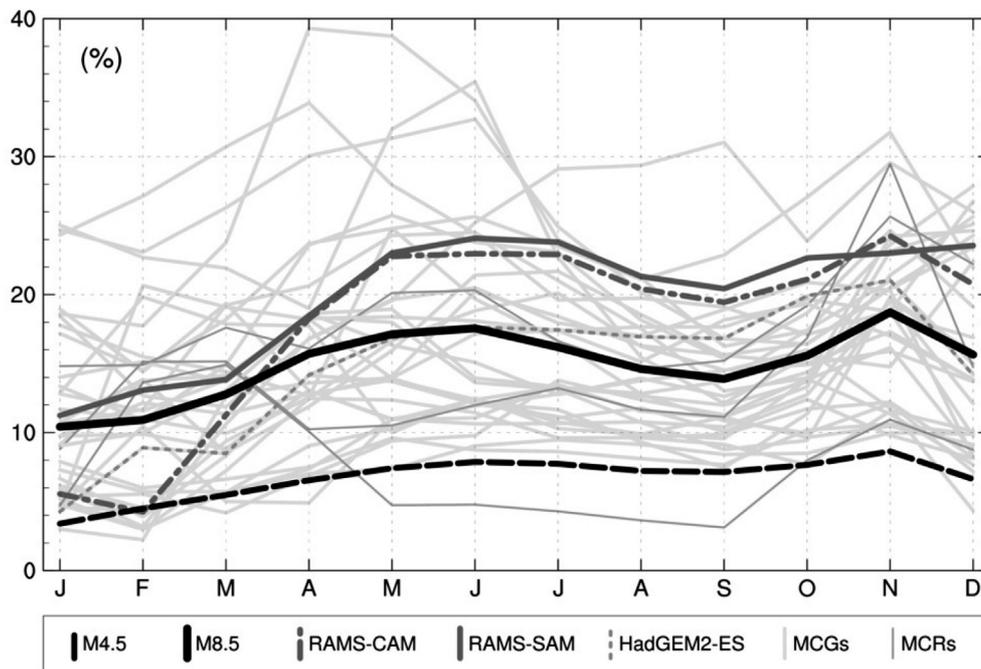
Na Fig. 24 são mostrados os campos de diferença de M para a evapotranspiração potencial anual média simulada no cenário RCP8.5 em relação ao *Historical*.

As mudanças no campo de ETo são de aumento de até 300 mm/a no RCP8.5 *Long*, do centro ao oeste do NEB para a média dos modelos. A região mais próxima da costa é projetada para ter valores da média anual entre 200 e 220 mm/a maiores, e o aumento se dá de forma gradual da costa ao centro do NEB para M.

As mudanças para longo prazo na ETo média do NEB, assim como para a temperatura, são de quase o dobro para mais no RCP8.5 que no RCP4.5, visto na distribuição acumulada de probabilidade dada na Fig. 25 para esses dois cenários. O modelos RCA4-Had, menos pessimista do con-



**Figura 22** - Médias anuais de evapotranspiração potencial do NEB. O experimento *Historical* é dado de 1986 a 2005, e os RCPs de 2006 a 2099. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior. Com exceção de M4.5 (M no RCP4.5), as médias de 2006-2099 são para RCP8.5.

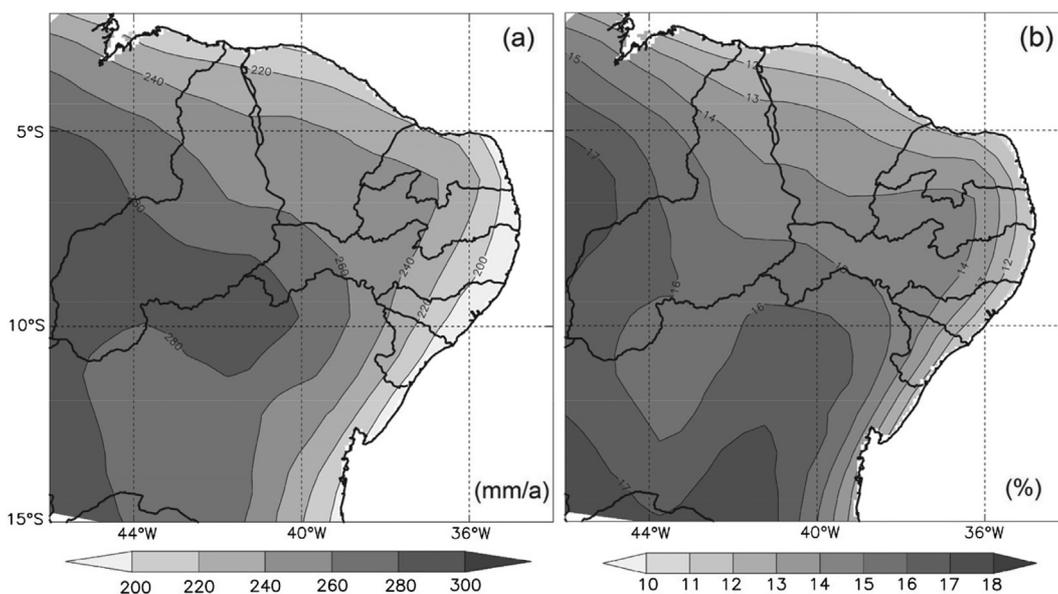


**Figura 23** - Diferenças percentuais das climatologias futura (2079-2099) e histórica (1985-2005) para a evapotranspiração potencial do NEB. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior.

junto, projeta 4% de aumento na média futura (2079-2099) no RCP4.5, e 7,4% no RCP8.5. Já o modelo mais pessimista para o RCP8.5, bcc-csm1-1-m, aponta aumento de 24,1% na taxa de evapotranspiração potencial média do NEB.

M (+15%). No RCP4.5 M se mostra também como divisor entre os 50% mais pessimistas, e os 50% com projeções percentuais menores, apontando M +6,8% na média futura para o cenário de menores emissões.

O RAMS projeta aumento percentual na média de ETO em longo prazo no RCP8.5 de +17,7% e +19,9%, para os domínios CAM e SAM, respectivamente, fazendo parte do grupo de 50% dos modelos com projeções acima da de



**Figura 24** - Campos de diferença (quadro a) e de diferença percentual (quadro b) da média anual RCP8.5 Long (2079-2099) e Historical (1985-2005) de evapotranspiração potencial para o NEB para a média das simulações.

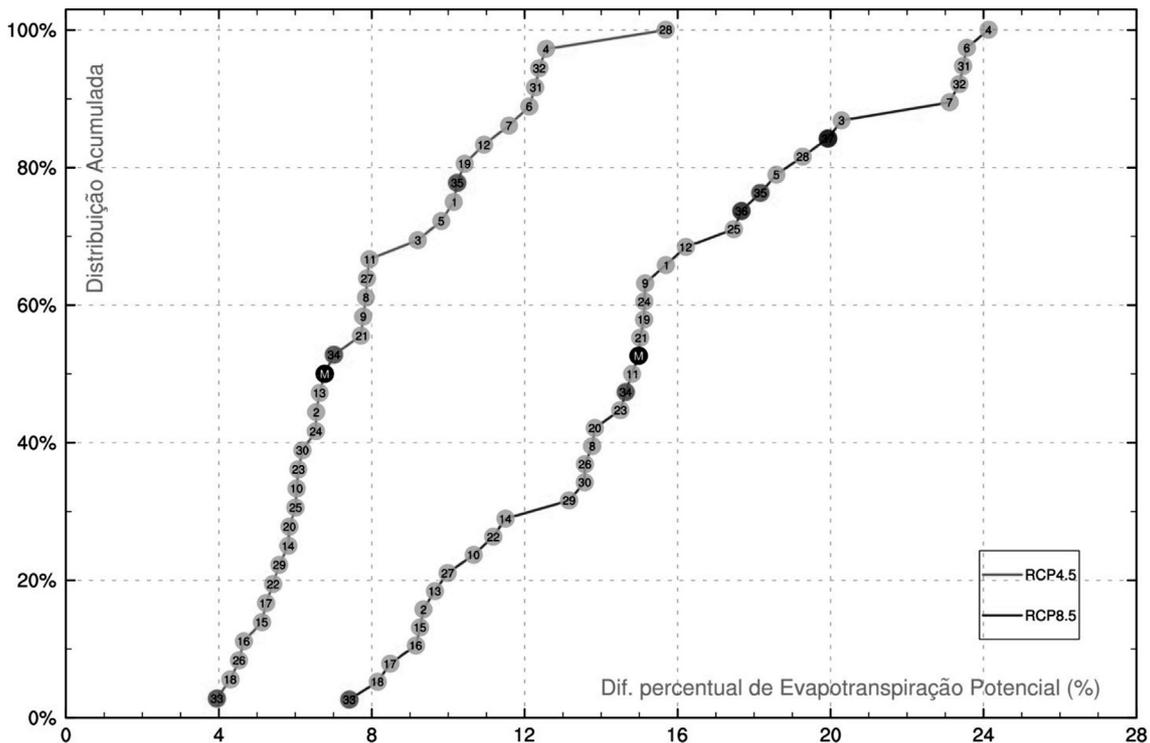


Figura 25 - Distribuição acumulada das diferenças percentuais das médias de evapotranspiração potencial do NEB entre os RCPs (2079-2099) e *Historical* (1985-2005).

### 3.4. Índice de aridez

#### 3.4.1. Simulações do clima presente

O índice de aridez do NEB se distribui espacialmente com valores menores no centro da região da análise com índices mais altos na área da costa do leste do NEB e do Maranhão - locais úmidos, como mostrado no quadro (a) da Fig. 26 dos campos médios do IA para o período histórico. As áreas tendendo a áridas se estendem desde o litoral do Ceará e Rio Grande do Norte, até a divisa da Bahia com

Minas Gerais, onde se têm IA abaixo de 0,5, contendo áreas semiáridas e áridas - meio da divisa de Pernambuco com a Bahia, onde passa o Rio São Francisco.

A média dos modelos carrega as características de grande escala da precipitação (Fig. 12) para o IA, onde se têm muita precipitação na região norte do NEB, fazendo o IA ter valores bem altos em comparação ao observado. Apesar disso, M tem padrão de distribuição espacial do IA com aspecto geral do NEB, mostrando valores menores na parte mais central se estendendo em paralelo à costa leste, e

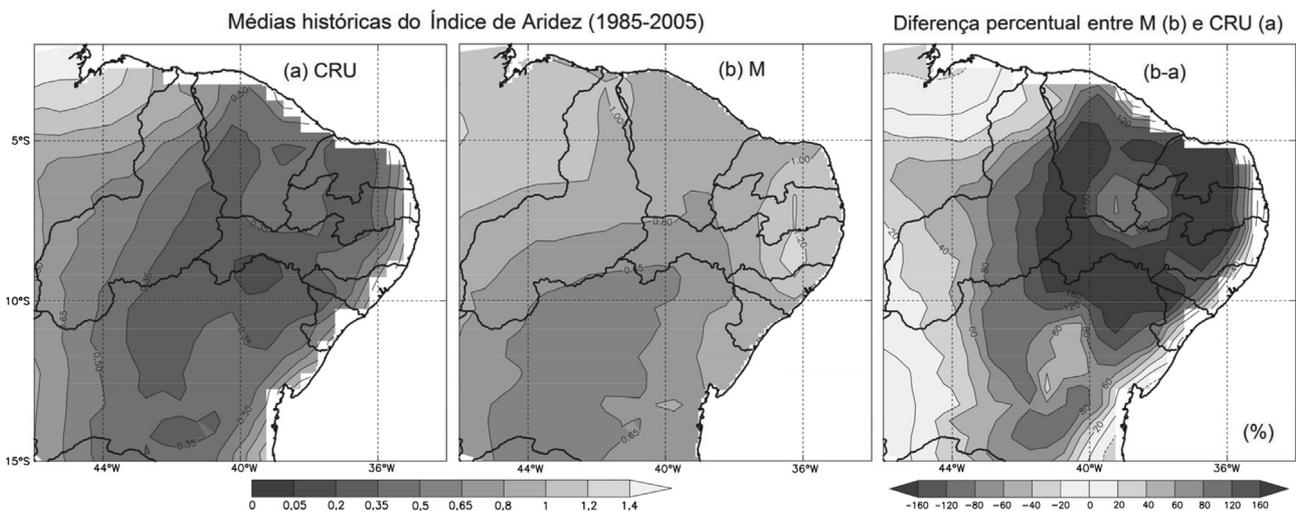


Figura 26 - Campo da média de 1985-2005 do índice de aridez para o NEB do CRU e de M. O quadro (b-a) é a diferença percentual entre M e o CRU.

valores maiores no Maranhão e parte da Zona da Mata, como visto para o CRU.

As dificuldades em representar a precipitação, associadas aos erros de ETo, resultam em diferenças percentuais da média histórica do IA em grande parte no sentido superior da escala - quadro (b-a) da Fig. 26 -, com a área mais árida do NEB tendo diferenças para M acima de 160%.

O desempenho dos modelos em geral é apresentado no diagrama de Taylor da Fig. 27, para o qual se faz a análise da correlação, desvio padrão e raiz do erro quadrático médio, para o campo histórico médio do índice de aridez.

O CanESM2, RAMS-SAM, MIROC-ESM e MIROC-ESM-CHEM são os modelos que melhor representaram o campo do IA observado, cujos valores de COP, nessa ordem que eles são citados, são: 0,8, 0,78, 0,75, 0,74, valores bastante altos levando em consideração a quantidade de variáveis envolvidas no cálculo do índice de aridez, e seus erros. Desses 4 melhores modelos o RAMS-SAM é o que apresenta mais erro, RMS igual a 0,24, enquanto os demais têm valores de RMS menores que 0,19 (Fig. 27).

No setor de correlação espacial de 0,3 a 0,7 do IA (Fig. 27) se encontram M, RAMS-CAM, RCA4-Had, RCA4-EC, e outros 11 MCGs. Dentre eles o RAMS-CAM é o que tem COP mais alta, 0,65. Já M, que tem RMS de 0,24 e desvio padrão 30% menor em relação ao CRU, apresentam correlação de 0,55.

Com valores de COP menores que 0,3 no diagrama de Taylor da Fig. 27 se têm uma grande parcela dos modelos, contando com 18 MCGs e o RCA4-MPI (COP = -0,07).

Dentre eles se encontram os modelos com maiores erros, com 5 MCGs apresentando RMS normalizado acima de 2 (RMS = 0,56), sendo eles o GISS-E2-R-CC (0,6), GISS-E2-R (0,64), GISS-E2-H-CC (0,89), GISS-E2-H (0,89), e inmcm4 (0,9).

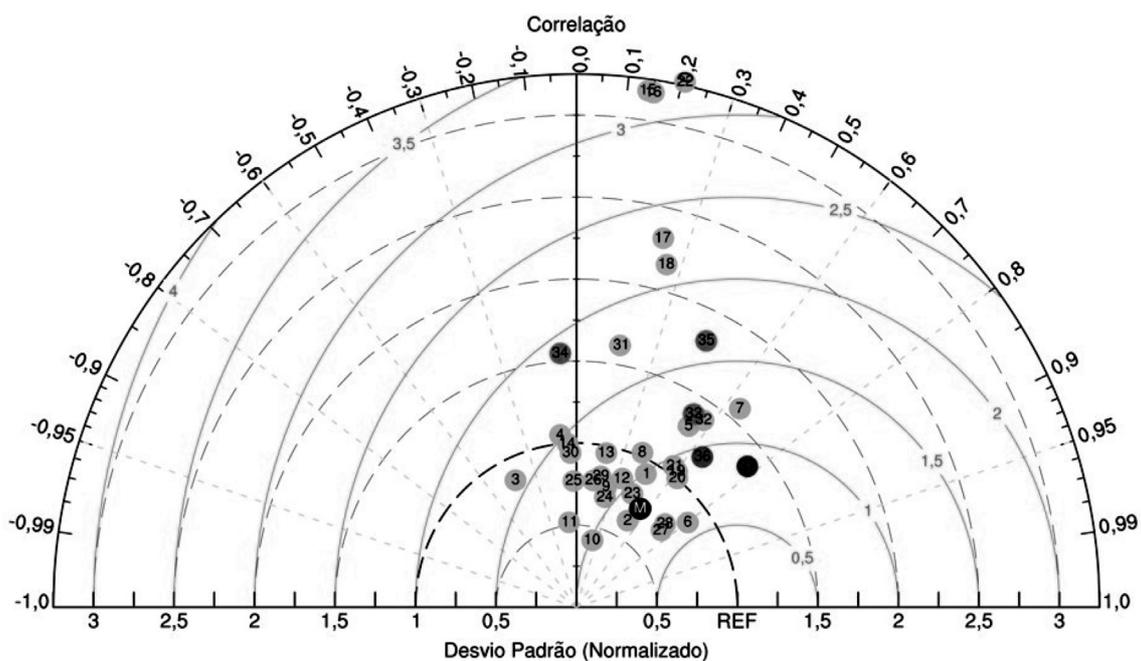
O CRU tem IA médio sobre o NEB de 0,53, o que caracteriza a região de estudo com clima médio subúmido seco. O RAMS-SAM, HadGEM2-AO, MIROC-ESM, NorESM1-M, e HadGEM2-CC são os que têm médias mais próximas do CRU, dentro do intervalo de  $\pm 0,05$ .

O CanESM2, modelo de melhor correlação com o CRU para o campo histórico do IA, faz parte do grupo de modelos com diferenças na média de  $\pm 0,05$  a  $\pm 0,010$ , composto por mais 5 MCGs, RCA4-Had e RAMS-CAM. Dentro do intervalo de erro na média de  $\pm 0,10$  a  $\pm 0,30$  se encontram outros 9 MCGs, já M tem média quase nesse grupo, apresentando diferença de 0,31 em relação ao CRU.

#### 3.4.2. Simulações do clima futuro

Os resultados para o índice de aridez do clima futuro do NEB são mostrados a seguir. Mesmo com os modelos apresentando séries anuais do IA bastante espalhadas - como se verifica para a precipitação (Fig. 14) - as médias anuais de M nos RCP4.5 e RCP8.5, mostradas na Fig. 28, findam o século com valores anuais menores que a média na *Historical* (1986-2005).

Os dois representantes do RAMS apresentam médias anuais do IA do NEB variando no entorno da série observada, seguindo o HadGEM2-ES. No time-slice de longo prazo o RAMS-CAM e o RAMS-SAM mostram valores anuais do IA variando de forma similar, ambos projetando



**Figura 27** - Diagrama de Taylor da média histórica do índice de aridez do NEB. Os eixos vertical e horizontal representam o desvio padrão, e as linhas circulares centradas no ponto REF representam a RMS, normalizados pela divisão ao desvio padrão da observação.

próximos de M4.5 e M8.5, mas o RAMS-SAM apresenta picos acima de 1, valor não ultrapassado nos 20 anos do *Historical* (Fig. 28).

Na Tabela 5 são apresentadas as diferenças percentuais (Dif. %) entre a projeção dos modelos aplicada ao CRU e o próprio valor histórico das áreas do CRU, distinguindo as áreas do IA extintas (E), e as que surgem (em unidades de 1000 km<sup>2</sup>) nas projeções. As classes C1, C2, C3, C4 e C5 são referentes ao IA, seguindo a classificação da Tabela 1, sendo: C1 - Hiperárido, C2 - Árido, C3 - Semiárido, C4 - Subúmido seco, e C5 - Subúmido úmido.

São incluídas ainda na Tabela 5 o tamanho das áreas de cada classe para o clima presente, dadas no IA do CRU - parte inferior da tabela. Como visto na Fig. 26 (quadro (a)), o CRU não apresenta áreas hiperáridas, com uma pequena porção da região estudada sendo árida (15000 km<sup>2</sup>), a maior porcentagem do domínio sendo semiárido (776000 km<sup>2</sup>), contornado em grande parte por áreas subúmidas secas (197000 km<sup>2</sup>), e na Zona da Mata e parte oeste do domínio incluindo a maior parte do Maranhão se observando IA subúmido úmido - perfazendo 407000 km<sup>2</sup>.

#### 4. Conclusões

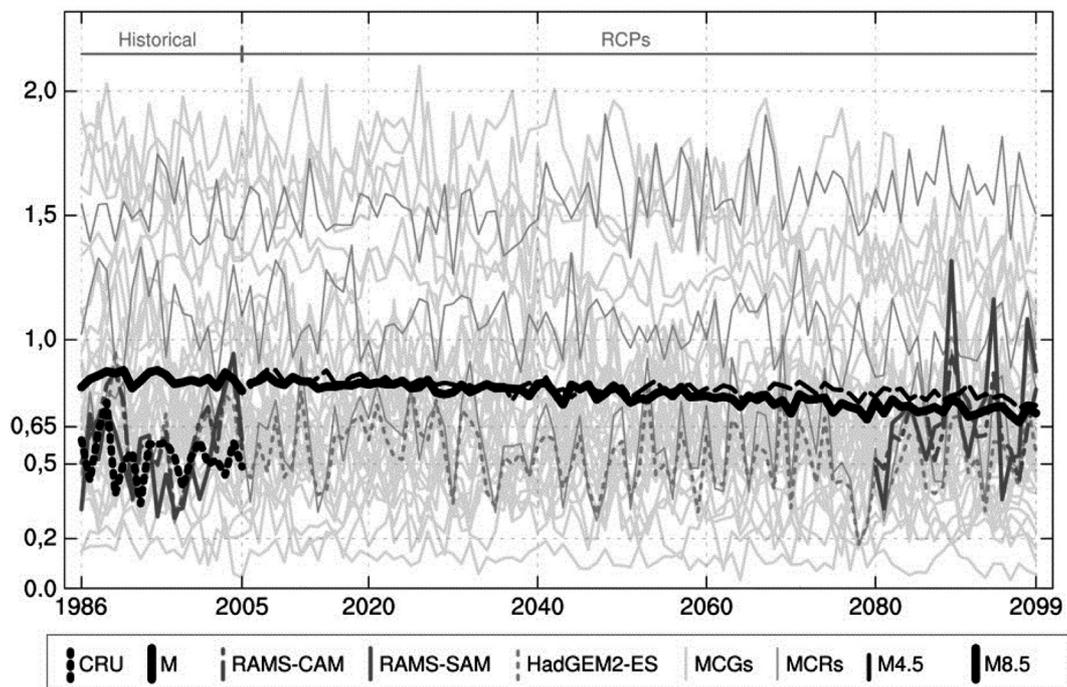
A temperatura e a evapotranspiração potencial têm padrão climatológico observado parecido, dada a relação entre elas na aplicação do método Penman-Monteith-FAO. De setembro a dezembro TAS e ETo apresentam os maiores valores mensais médios, com TAS tendo período menos quente na climatologia com valores mais baixos em julho,

enquanto a ETo tem valores do ciclo anual mais baixos centrados em maio, coincidindo com o final da estação chuvosa que deve influenciar na parte de umidade do cálculo de ETo. Os máximos pluviométricos climatológicos do NEB ocorrem entre DJF e MAM (março a maio), estações em que ocorre a maior porcentagem da precipitação anual.

Muitos dos modelos estudados foram capazes de reproduzir os valores climatológicos de temperatura, evapotranspiração potencial e precipitação de forma considerável. Dentre essas variáveis, a precipitação foi mais complicada de ser representada pelos modelos, principalmente a estação chuvosa do NEB, em que os resultados para a climatologia se mostraram mais espalhados. M tem climatologia de ETo bastante próxima da observação, sendo também boa representante dos dados modelados para TAS e PR.

Nas séries mensais da média sobre o NEB de ETo 90% dos modelos mostram confiança tolerável ou melhor, enquanto para TAS e PR os modelos se dividem em torno de 50% deles com simulações de confiança acima de tolerável, e os demais com índice de confiança (IC - Camargo e Sentelhas, 1997) de ruim a péssimo. É importante destacar que M tem resultados para as séries mensais e sazonais de TAS, PR e ETo com IC bom em pelo menos um dos casos (mensal ou sazonal), com as três variáveis sendo modeladas melhor sazonalmente.

O campo da média histórica de temperatura observada é bem representado pelos modelos em geral, todos conseguindo representar a variabilidade espacial com pelo menos 0,6 de correlação, RMS e desvio padrão normali-



**Figura 28** - Médias do índice de aridez do NEB. O experimento *Historical* é dado de 1986 a 2005, e os RCPs de 2006 a 2099. Esquemas de cores e simbologia utilizados são mostrados no quadro inferior. Com exceção de M4.5 (M no RCP4.5), as médias de 2006-2099 são para o RCP8.5.

**Tabela 5** - Projeção do tamanho das áreas do índice de aridez do CRU para o NEB no RCP8.5.

N	Dado	Dif. % / Extinção (E) ou Aparição (*) de áreas					N	Dado	Dif. % / Extinção (E) ou Aparição (*) de áreas				
		C1	C2	C3	C4	C5			C1	C2	C3	C4	C5
	M	-	+300	+6	+23	-34	19	HadGEM2-AO	-	+480	+28	-8	-68
1	ACCESS1-0	-	+120	+30	+6	-65	20	HadGEM2-CC	-	E	+8	+47	-34
2	ACCESS1.3	-	E	-20	+70	+8	21	HadGEM2-ES	-	-20	+17	+25	-43
3	bcc-csm1-1	-	+1260	+2	+16	-59	22	inmcm4	-	+780	+3	+6	-38
4	bcc-csm1-1-m	-	+1760	+4	-17	-65	23	IPSL-CM5A-LR	-	E	-62	+80	+83
5	BNU-ESM	-	+1680	-4	-6	-53	24	IPSL-CM5A-MR	-	E	-54	+39	+89
6	CanESM2	-	+3480	-8	-63	-86	25	IPSL-CM5B-LR	-	+1240	+10	-22	-55
7	CESM1-CAM5	-	+1080	-4	+20	-43	26	MIROC5	-	+200	+15	-3	-36
8	CMCC-CM	-	0	-7	+6	+11	27	MIROC-ESM	-	+20	+9	+3	-19
9	CMCC-CMS	-	0	-4	+11	+2	28	MIROC-ESM-CHEM	-	+1840	-2	-30	-52
10	CNRM-CM5	-	+20	+1	+6	-5	29	MPI-ESM-LR	-	0	+1	+47	-24
11	CSIRO-Mk3-6-0	12*	+3760	-13	-52	-95	30	MPI-ESM-MR	-	+100	+3	+25	-21
12	GFDL-CM3	-	+800	+9	-13	-41	31	MRI-CGCM3	-	+560	+12	+5	-47
13	GFDL-ESM2G	-	+220	+6	+22	-30	32	NorESM1-M	-	+3440	-17	-50	-74
14	GFDL-ESM2M	-	+940	+0	+9	-41	33	RCA4-Had	-	E	-4	+23	-2
15	GISS-E2-H	-	+1080	+2	-2	-43	34	RCA4-MPI	-	+140	+9	+27	-38
16	GISS-E2-H-CC	-	+1520	-4	-6	-47	35	RCA4-EC	-	0	-9	+8	+14
17	GISS-E2-R	-	+740	+6	+14	-46	36	RAMS-CAM	-	-80	-11	+45	+2
18	GISS-E2-R-CC	-	+480	+14	-6	-42	37	RAMS-SAM	-	E	-31	+41	+42
	CRU	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>		Área do IA em unidades de 1000 km <sup>2</sup>					
		0	15	776	197	407							

zados dentro das faixas de 1 e 0,5 respectivamente. Os MCRs e M são os que se destacam na representação espacial, sendo os mais próximos do ponto de referência no diagrama de Taylor.

Dada à característica episódica da precipitação os campos dela são relatados como mais complicados de se representar que a temperatura, principalmente em escala regional ou local, como citado no AR5 (Flato *et al.*, 2013). Verifica-se então exatamente isso nos resultados dos modelos para o NEB, enquanto para o campo da média histórica de TAS os modelos têm correlação acima de 0,6, apenas o RAMS-SAM (COP = 0,71) e o CanESM2 (COP = 0,7) conseguem o mesmo para a precipitação. Dessa forma, os resultados modelados que se destacam para o campo da média histórica de precipitação se encontram no setor de COP acima de 0,3 e RMS menor que 596 mm/a, sendo M um dos melhores resultados, com desvio padrão bem próximo do CRU, assim como o CanESM2, e RMS menor que o do RAMS-SAM, ficando atrás somente do CanESM2.

ETo, que para a maioria das simulações se têm índice confiança pelo menos tolerável para as séries das médias mensais e sazonais, a distribuição espacial das taxas de evapotranspiração potencial sobre o NEB foi mal representada por uma parcela dos modelos, 20 deles no setor de valores menores que 0,2 de correlação com a observação

para a média de 1985-2005. A dificuldade dos modelos para o campo da média histórica pode ser devido ao cálculo de ETo envolver muitas variáveis, embora M (que tem COP de 0,39) e outros modelos mostrem destreza, captando o padrão de grande escala.

Para o campo do IA do clima presente a precipitação foi a que mais mostrou influência, sendo carregado ao campo histórico da média do IA o perfil do padrão de PR, visto isso tanto para a observação quanto para os modelos. Dessa forma, a distribuição dos modelos no diagrama de Taylor do período histórico do IA tem semelhança com a de PR, onde se tem resultados melhores no setor de correlação espacial acima de 0,3.

Os erros de viés da precipitação transmitem à média do IA do NEB no período histórico diferenças por parte dos modelos em relação ao CRU, uma vez que as mesmas médias para ETo dos modelos apresentam diferenças relativamente menores que as de PR, onde para ETo M tem diferença da média com CRU de -30 mm/a, enquanto para PR a mesma diferença é de +423 mm/a. Assim, as médias para o clima presente de TAS e ETo são melhor representadas pelo conjunto, já PR e o IA tiveram maiores diferenças, mas para todos os casos (PR, TAS, ETo e IA) se teve modelos apresentando resultados bons para a média.

As projeções de temperatura são de aumento em todos os aspectos, e mais atenuado no cenário de mais emissões de GEEs. Os modelos em geral não apontam muitas modificações quanto à variabilidade anual da média sobre o NEB, e as diferenças na climatologia futura são maiores nos meses mais quentes. O campo da temperatura média da média das simulações futuras no RCP8.5 *Long* apresenta diferenças maiores adentrando ao continente, o que é esperado, já que a retenção de calor no sistema climático se manifesta primeiro na superfície de terra, e posteriormente nos oceanos.

ETo tem projeções no mesmo sentido que a temperatura, tendo o NEB projeções para a média no RCP8.5 *Long* de taxas mais elevadas entre 7% e 25%, com o resultado mais confiável (M) apontando +15%. O aumento nas taxas de ETo no passar do século XXI não é tão expressivo quanto à resposta da temperatura aos efeitos das mudanças nas concentrações de GEEs, mas alguns modelos mostram mudanças na variabilidade anual, como é o caso do RAMS-SAM, que no final do século XXI mostra mudanças na amplitude decenal de ETo de forma expressiva.

De forma mais tímida, a precipitação dada por M nos anos analisados para os cenários RCPs, tem diminuição nas médias anuais do NEB, com os dois RCPs apresentando valores próximos. As discrepâncias entre os modelos para a precipitação histórica são mantidas nas projeções, mas a maioria concorda com diminuição percentual nas estações de menor precipitação e final da estação chuvosa, bem como para menor acúmulo anual médio no RCP8.5 *Long*.

A combinação das projeções de aumento de ETo e diminuição da precipitação resulta no índice de aridez futuro menor para a maioria dos modelos. O CanESM2, um dos melhores modelos para o clima do nordeste para as três variáveis analisadas (TAS, PR e ETo), é o modelo que aponta a maior mudança percentual na média futura no RCP8.5 *Long*, de -46,7%, promovendo projeção de aumento na extensão da zona árida do NEB em +3480%. Na média das simulações se tem indicativos de mudanças também preocupantes, diminuição de 34% de área subúmida úmida, e aumento nas demais áreas onde já se observa IA menor no clima presente.

Um dos MCGs, o CSIRO-Mk3-6-0, que tem projeções pessimistas no RCP8.5, aponta o surgimento de uma área hiperárida entre os Sertões Central e Inhamus do Ceará de 12000 km<sup>2</sup>, sendo esse tipo de clima que se encontra em desertos, tendo assim dentre as projeções futuras um exemplo de impacto de difícil recuperação.

Diante do que foi apresentado até aqui, a continuação da análise climática do NEB, fazendo estimativas de possíveis secas (usando um índice como o SPI - *Standardized Precipitation Index* - ou SPEI - *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*), seria relevante no sentido de elaborar projeções sobre como a delimitação do semiárido mudaria, tendo em vista as mudanças antrópicas que cada vez mais se tornam evidentes.

## Agradecimentos

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) fomentou o trabalho com a concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor pelo projeto ACNE - Programa Áreas Estratégicas CAPES/FUNCAP (Edital 03/2013, Processo AE1-0052-000110100/11), e suporte logístico para execução dos projetos de pesquisa que contribuíram com a elaboração do trabalho.

## Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage paper, Rome, Italy, n. 56, 300 p, 1998.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BRASIL. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 134 p, 2007.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CHEN, C.; COTTON, W.R. A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 25, n. 3, p. 289-321, 1983.
- CHRISTENSEN, J.H.; KANIKICHARLA, K.K.; ALDRIAN, E.; AN, S.-I.; CAVALCANTI, I.F.A.; DE CASTRO, M.; DONG, W.; GOSWAMI, P.; HALL, A.; KANYANGA, J.K.; KITOH, A.; KOSSIN, J.; LAU, N.-C.; RENWICK, J.; STEPHENSON, D.B.; XIE, S.-P.; ZHOU, T. Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. 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, 2013.
- CHRISTENSEN, O.B.; GUTOWSKI, W.J.; NIKULIN, G.; LEGUTKE, S. **CORDEX Archive Design**. v. 3.1, 23 p, 2014.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resoluções do CONAMA: resoluções vigentes publicadas entre julho de 1984 e novembro de 2008**. 2. ed. Brasília, 928 p, 2008.
- CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, D.; FACCHINI, M.C.; FRAME, D.; MAHOWALD, N.; WINTHER, J.-G. Introduction. 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, 2013.
- CUXART, J.; BOUGEAULT, P.; REDELSPERGER, J.-L. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy

- simulations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 126, n. 562, p. 1-30, 2000.
- DINPASHOH, Y.; FAKHERI-FARD, A.; MOGHADDAN, M.; JAHANBAKHS, S.; MIRNIA, M. Selection of Variables for the purpose of regionalization of Iran's Precipitation Climate using Multivariate methods. **Journal of Hydrology**, v. 1, n. 297, p. 109-123, 2004.
- 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.; KATTSOV, 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, 2013.
- FREITAS, M.A.S. Um Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semi-Áridas. **Revista Tecnologia (UNIFOR)**, Fortaleza, v. Suplem, p. 84-95, 2005.
- FRITSCH, J.M.; CHAPPELL, C. Numerical simulation of convectively driven pressure system. Part I: convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, p. 1722-1733, 1980.
- GIORGI, F.; JONES, C.; ASRAR, G. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. **WMO Bulletin**, v. 58, n. 3, p. 175-183, 2009.
- HARRIS, I.; JONES, P.D.; OSBORN, T.J.; LISTER, D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642, 2014.
- INSA. Instituto Nacional do Semiárido. **Sinopse do Censo Demográfico para o Semiárido Brasileiro**. MEDEIROS, S.S.; CAVALCANTE, A.M.B.; MARIN, A.M.P.; TINOCO, L.B.M.; SALCEDO, I.H.; PINTO, T.F. Campina Grande, 103 p, 2012.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- 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, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p, 2013.
- 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., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1-32, 2014.
- KAIN, J.; FRITSCH, J.M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convection parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 23, p. 2784-2802, 1990.
- KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.K.; HNILO, J.J.; FIORINO, M.; POTTER, G.L. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1631-1643, 2002.
- KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V. Tempo e clima no Brasil. [CAVALCANTI, I.F.A., FERREIRA, N.J., SILVA, M.G.A.J., DIAS, M.A.F.S. (org.)]. Cap. 14. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2009.
- LIMA, R.C.C.; CAVALCANTE, A.M.B.; MARIN, A.M.P. **Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro**. (Ed). Instituto Nacional do Semiárido - INSA, Campina Grande, 209 p, 2011.
- MARENGO, J.A.; VALVERDE, M.C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, p. 5-28, 2007.
- MARENGO, J.A. Tempo e clima no Brasil. [CAVALCANTI, I.F.A., FERREIRA, N.J., SILVA, M.G.A.J., DIAS, M.A.F.S. (org.)]. Cap. 25. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2009.
- MATALLO JUNIOR, H. **A desertificação no mundo e no Brasil**. In: SCHENKEL, C.S. e MATALLO JR, H (Org). *Desertificação*. Brasília: UNESCO, 2003.
- MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary-layers. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 7, p. 1791-1806, 1974.
- MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics**, v. 20, n. 4, p. 851-875, 1982.
- NEW, M.; HULME, M.; JONES, P.D. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. **Journal of Climate**, v. 12, p. 829-856, 1999.
- OYAMA, M.D.; NOBRE, C.A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophysical Research Letter**, v. 30, n. 23, p. 2199, 2003.
- PBMC. **Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1º Relatório de Avaliação Nacional do PAINEL Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Volume Especial para a Rio+20. Rio de Janeiro, Brasil, 34 p, 2012.
- RIBEIRO, A.; VICTORIA, R.L.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; MARTINELLI, L.A.; MORTATTI, J. Análise do Regime pluviométrico da região Amazônica a partir de dados de onze localidades. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 11, n. 1, p. 25-26, 1996.
- 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. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste Brasileiro utilizando a técnica de *downscaling* dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.

- SAMPAIO, E.V.S.B.; SAMPAIO, Y.; ARAÚJO, T.V.S.B.; SAMPAIO, G.R. **Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 202 p, 2003.
- SAMUELSSON, P.; JONES, C.G.; WILLÉN, U.; ULLERSTIG, A.; GOLLVIK, S.; HANSSON, U.; JANSSON, C.; KJELLSTRÖM, E.; NIKULIN, G.; WYSER, K. The Rosby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance. *Tellus A*, v. 63, p. 4-23, 2011.
- SASS, B.H.; RONTU, L.; SAVIJÄRVI, H.; RÄISÄNEN P. HIRLAM-2 Radiation scheme: documentation and tests. **Hirlam Technical Report**, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, n.16, 43 p, 1994.
- SAVIJÄRVI, H. A fast radiation scheme for mesoscale model and short-range forecast models. *Journal of Applied Meteorology*, v. 29, n. 6, p. 437-447, 1990.
- SCHEFF, J.; FRIERSON, D.M.W. Terrestrial Aridity and Its Response to Greenhouse Warming across CMIP5 Climate Models. *Journal of Climate*, v. 28, n. 14, p. 5583-5600, 2015.
- SELLERS, P.J.; DICKINSON, R.E.; RANDALL, D.A.; BETTS, A.K.; HALL, F.G.; BERRY, J.A.; COLLATZ, G.J.; DENNING, A.S.; MOONEY, H.A.; NOBRE, C.A.; SATO, N.; FIELD, C.B.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, v. 275, p. 502-509, 1997.
- SHUTTLEWORTH, W.J.; WALLACE, J.S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. v. 111, p. 839-855, 1985.
- SILVA, V.P.R.; PEREIRA, E.R.R.; ALMEIDA, R.S.R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, n. 2, p. 163-172, 2012.
- SILVEIRA, C.S.; SOUZA FILHO, F.A.; CABRAL, S.L. Análise das Projeções de Precipitação do IPCC-AR4 para os Cenários A1B, A2 e B1 para o Século XXI para Nordeste Setentrional do Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 117-134, 2013a.
- SILVEIRA, C.S.; SOUZA FILHO, F.A.; COSTA, A.A.; CABRAL, S.L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013b.
- SIMMONS, A.J.; BURRIDGE, D.M. An energy and angular-momentum conserving finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Monthly Weather Review*, v. 109, n. 4, p. 758-766, 1981.
- STRANG, D.M.G.D. **Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste Brasileiro**. Centro Técnico Aeroespacial, Relatório Técnico IAE-M-02/72, 70 p, 1972.
- TAYLOR, K.E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, n. 7, p. 7183-7192, 2001.
- TAYLOR, K.E.; STOUFFER, R.J.; MEEHL, G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, p. 485-498, 2012.
- UNEP. United nations environment programme. **World atlas of desertification**. Barrow, C.J. Edited by N. Middleton and D.S.G. Thomas. Edward Arnold, London, Land Degradation and Development, v. 3, n. 4, 249 p, 1992.
- UNESCO. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Map of the world distribution of arid regions: Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note**. MAB Technical Notes 7, Paris, 54 p, 1979.
- WALKO, R.; COTTON, W.R.; MEYERS, M.P.; HARRINGTON, J.Y. New RAMS cloud microphysics parameterization part I: the single-moment schem. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 38, n. 1-4, p. 29-62, 1995.
- WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.
- WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 3. ed. Academic press, v. 100, 704 p, 2011.
- XIANFU, L. **Guidance on the development of regional climate scenarios for vulnerability and adaptation assessment within the Framework of National Communications from Parties not Included in Annex I to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. National Communications Support Programme. UNDP-UNEP-GEF New York, USA, 42 p, 2006.