

Artigo

Avaliação do Desempenho dos Modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de Indicadores de Extremos Climáticos de Precipitação para a Bacia Amazônica

Adriane Lima Brito¹ , José Augusto Paixão Veiga¹, Francis Wagner Correia¹,
Vinícius Buscioli Capistrano¹

¹*Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, AM, Brasil.*

Recebido em: 15 de Outubro de 2017 - Aceito em: 23 de Julho de 2018

Resumo

O cálculo de indicadores climáticos a partir de dados observados e de modelos climáticos é uma maneira eficiente de identificar possíveis variações climáticas sobre a bacia Amazônica. Embora seja frequente a avaliação de desempenho de modelos climáticos a partir de dados de precipitação e temperatura, a avaliação de suas performances utilizando-se indicadores climáticos ainda é pouco explorada, principalmente para a bacia Amazônica. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo principal quantificar e avaliar a destreza dos modelos HadGEM2-ES e Eta na representação de oito indicadores climáticos. Os indicadores foram determinados a partir do total diário de precipitação proveniente do Climate Prediction Center. Para quantificar o desempenho de ambos modelos, foram calculados o viés e o erro médio quadrático. Estes métodos foram aplicados com base na média anual dos indicadores climáticos para o período de 1981 a 1990. Os resultados mostram que o viés dos modelos HadGEM2-ES e Eta apresenta semelhança na maioria dos indicadores climáticos. Em relação ao erro médio quadrático, observou-se que nem todos os indicadores de extremos climáticos baseados em dados de precipitação são bem representados por ambos modelos, porém o Eta apresentou melhor performance em relação ao HadGEM2-ES.

Palavras-chave: indicadores de extremos climáticos, bacia Amazônica, precipitação.

Performance Evaluation of the HadGEM2-ES and Eta Models from Climatic Extremes of Precipitation for the Amazon Basin

Abstract

The calculation of climate index from observed data and climate models is an efficient way of identifying possible climatic variations on the Amazon basin. Although it is frequent to evaluate the performance of climate models from precipitation and temperature data, the evaluation of their performances using climate index is still little explored, mainly for the Amazon basin. Thus, the present work main objective was to quantify and evaluate the dexterity of the HadGEM2-ES and Eta models in the representation of eight climate index. The climate index was determined from the daily precipitation from the Climate Prediction Center. To quantify the performance of both models, the bias and mean square error were calculated. These methods were applied on the basis of the annual average of the climate index for the period 1981 to 1990. The results show that the bias of HadGEM2-ES and Eta models is similar in the most climate index. Regarding the mean square error, it was observed that not all climatic extremes indicators based on precipitation data are well represented by both models, but Eta presented better performance in relation to HadGEM2-ES.

Keywords: indicators of climatic extremes, Amazon basin, precipitation.

1. Introdução

A bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do planeta e possui área de drenagem da ordem de 6.112.000

km², o que corresponde a aproximadamente 37% da América do Sul (Silva, 2010). A bacia Amazônica é caracterizada pela heterogeneidade espacial e temporal da

precipitação, com valor médio anual na bacia da ordem de 2.300 mm (Marengo, 2004). Os maiores totais anuais de precipitação ocorrem no litoral do Amapá, na foz do rio Amazonas e no setor ocidental da bacia (Nimer, 1979). O regime de precipitação sobre a bacia é fortemente influenciado por sistemas meteorológicos de diferentes escalas espaciais e temporais, tais como: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Alta da Bolívia (AB), sistemas de escala sinótica, linhas de instabilidade, formação de aglomerados convectivos, entre outros (Reboita *et al.* 2010).

Apesar do intenso ciclo hidrológico, a bacia Amazônica é sensível às variabilidades e mudanças no sistema climático, devido tanto às variações naturais, quanto às antropogênicas (Correia *et al.* 2007; Espinoza *et al.* 2014; Marengo e Espinoza, 2015). Sabe-se que as chuvas extremas, ademais, causam grandes escoamentos superficiais, mesmo em solos não saturados, o que pode causar inundações, deslizamentos de terra e danos estruturais. Por outro lado, a escassez de chuva pode causar grandes danos que afetam diferentes setores econômicos, social e ambiental no Brasil. Por exemplo, as usinas hidrelétricas são afetadas com períodos secos prolongados, podendo causar crises de apagão (Valverde e Marengo, 2014).

Localmente, as variações dos extremos climáticos são medidas por meio de análises de séries históricas de variáveis meteorológicas, como por exemplo, temperatura do ar e precipitação. No final da década de 1990, a OMM (Organização Meteorologia Mundial), por meio de vários eventos científicos, criou os chamados “Indicadores de extremos climáticos” (Zhang e Yang, 2004). Foram, então, desenvolvidos 27 indicadores derivados de dados diários de temperatura e precipitação (Zin *et al.* 2010). Um dos principais objetivos da elaboração dos indicadores, é a sua utilização em estudos de monitoramento e detecção de alterações climáticas auxiliados por Modelos de Circulação Geral (MCGs) capazes de projetar o clima do globo para condições futuras (Araújo, 2015). As pesquisas sobre os extremos climáticos progrediram nas últimas décadas (Nicholls e Alexander, 2007; Zwiers *et al.* 2012) e isso se deve, em grande parte, a esforços conjuntos da comunidade científica.

O estudo observacional desenvolvido por Haylock *et al.* (2006) mostra que o padrão dos índices anuais de extremos de chuva, como por exemplo: o número de dias consecutivos secos (CDD), o número de dias consecutivos chuvosos (CWD) e o percentil de 95% de chuva (P95%) é semelhante ao da chuva total anual (PRCPTOT). Esse padrão foi notado na grande maioria das estações de superfície, mostrando aumento da umidade no Equador, no norte do Peru e em outras regiões da América do Sul. Por outro lado, sobre o sul do Peru e do Chile, foram observadas tendências de diminuição dos totais de chuva e dos valores extremos de chuva. Este resultado está de acordo com Skansi *et al.* (2013), os quais notaram que a

precipitação total anual na América do Sul é aproximadamente 92 mm maior no presente do que em 1950.

Chou *et al.* (2014), utilizando indicadores de extremos climáticos, verificaram que as simulações com o modelo regional Eta, aninhado ao modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES, mostram tendências para condições mais úmidas no período de 1961 a 1990 na maior parte da América do Sul, concordando com os resultados de Haylock *et al.* (2006). Em contrapartida, as simulações com o modelo Eta aninhado aos modelos do sistema terrestre MIROC5 e BESM, em geral, exibem tendências para condições mais secas sobre a maior parte da América do Sul, especialmente na parte norte do continente. Resultados similares foram encontrados por Marengo (2004), que identificou fraca tendência de aumento de chuva no setor sul da bacia Amazônica seguida de redução de chuva no setor norte.

Diante do exposto, analisar modelos numéricos (globais e/ou regionais), utilizando indicadores de extremos climáticos para a bacia Amazônica, são úteis no sentido de orientar atividades em setores como a defesa e proteção civil, a agricultura, a saúde, o planejamento urbano, o gerenciamento de recursos hídricos, entre outros. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal quantificar e avaliar a capacidade dos modelos HadGEM2-ES e Eta em simular indicadores climáticos baseados em dados de precipitação.

2. Metodologia

2.1. Dados observados

No presente trabalho foram utilizados dados de precipitação provenientes do Climate Prediction Center (CPC), pertencente ao National Centers for Environmental Prediction (NCEP). A análise da precipitação global do CPC é baseada na interpolação e controle de qualidade dos dados de precipitação de aproximadamente 30.000 estações meteorológicas de superfície, além de outras fontes de dados como registros históricos, radar, satélites e modelos numéricos (Chen *et al.* 2008). Os dados do CPC estão distribuídos em grade regular de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de latitude e longitude, dispostos em frequência diária para o período de 1979 até o presente.

2.2. Modelo global HadGEM2-ES

Para o presente trabalho, foram utilizados dados de precipitação provenientes do modelo HadGEM2-ES do UK Met Office, versão 2 da família de modelos HadGEM com as chamadas componentes de sistema terrestre (“ES” representa Earth System). Neste modelo, a configuração básica de acoplamento atmosfera-oceano, equivale aos processos do ciclo de carbono e à química da troposfera (Martin *et al.* 2011).

A componente atmosférica do modelo possui resolução espacial de aproximadamente $1,875^\circ$ por $1,25^\circ$, em longitude e latitude, respectivamente, e apresenta 38 níveis na vertical. A componente oceânica utiliza grade horizontal de $0,33^\circ \times 0,33^\circ$, com espaçamento de 1° , entre os polos e 30° , a grade é refinada gradualmente para $1/3$ e $1^\circ \times 1^\circ$ em latitudes acima de 30° e possui 40 níveis na vertical (Collins *et al.* 2008). Sobre o continente o ciclo do carbono é modelado pela dinâmica de vegetação TRIFFID (Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics), descrita em Cox (2001). No oceano o ciclo do carbono é dado pela biologia do oceano diat-HadOCC (Palmer e Totterdell, 2001). A química da atmosfera é modelada pelo esquema de química troposférica de UKCA (O'Connor *et al.* 2011). O modelo inclui processos químicos da atmosfera como carbono orgânico de combustível fóssil, nitrato de amônia, poeira e aerossóis biogênicos orgânicos (Martin *et al.* 2011). O HadGEM2-ES também diferencia cinco tipos de plantas, sendo elas: árvores de folhas largas e finas, gramas do tipo C3 e C4 e arbustos. Descrições mais detalhadas sobre o modelo HadGEM2-ES podem ser obtidas em Martin *et al.* (2011).

2.3. Modelo regional Eta

A terceira fonte de dados de precipitação é proveniente do modelo Eta. O Eta é um modelo atmosférico regional desenvolvido pela Universidade de Belgrado e aprimorado ao longo dos anos por pesquisadores do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) (Chou *et al.* 2005; 2012; Mesinger *et al.* 2012). A maior resolução espacial dos modelos de área limitada permite simular com maiores detalhes sistemas organizados em mesoescala. A grade do modelo é regular com $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ de latitude-longitude para a América do Sul, com 38 níveis na vertical. O Eta é um modelo em ponto de grade baseado na coordenada vertical (η) (Mesinger, 1984), sensível a áreas de montanha, o que torna a coordenada adequada para estudos em regiões de topografia íngreme como a Cordilheira dos Andes na América do Sul.

As parametrizações incluídas no modelo são: esquema de difusão turbulenta na Camada Limite Planetária, descrito em Mellor e Yamada (1974); esquema de radiação de ondas curta e longa segundo Fels e Schwarzkopf (1975) e Lacis e Hansen (1974), respectivamente. A precipitação no modelo é produzida pelos esquemas de cúmulos, proposto por Betts-Miller (Betts e Miller, 1986) e microfísica de nuvem, descrito em Zhao *et al.* (1997). Os processos de superfície são parametrizados de acordo com o esquema NOAH (Ek *et al.* 2003), que contém 4 camadas de solo (da superfície à camada mais profunda, os níveis são: 10, 30, 60 e 100 cm) para a temperatura e umidade, distingue 12 tipos de vegetação e 7 tipos de textura de solo.

O mapa de vegetação inclui as alterações decorrentes da acentuada ação antropogênica que vem ocorrendo no bioma amazônico nos últimos anos (Sestini *et al.* 2002). O modelo é adaptado para utilizar a temperatura da superfície do mar (TSM) derivada do modelo HadGEM2-ES. A integração no tempo utiliza a técnica split-explicit (Gadd, 1978), onde os termos devido ao ajuste pelas ondas de gravidade inerciais são integrados separadamente dos termos de advecção.

Nesse estudo, foram utilizados dados de precipitação provenientes do cenário do clima presente regionalizado pelo modelo Eta, aninhado com o modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES (Chou *et al.* 2014). Para o clima presente, correspondendo ao período de 1961 a 2005, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) foi mantida constante a 330 ppm. A TSM foi fornecida pelo modelo global HadGEM2-ES e atualizada diariamente durante a integração. As condições iniciais de umidade do solo e temperatura do solo foram derivadas do modelo do sistema terrestre. As condições de contorno lateral, provenientes do HadGEM2-ES, foram atualizadas a cada 6 horas.

2.4. Indicadores de extremos climáticos

Os indicadores de extremos climáticos foram estabelecidos para a detecção e atribuição das mudanças no clima, com um total de 27 indicadores com base em dados diários de precipitação (11 indicadores) e temperatura máxima e mínima (16 indicadores) (Karl *et al.* 1999; Peterson *et al.* 2001; Alexander *et al.* 2006; Valverde e Marengo, 2014). No entanto, para o presente trabalho foram utilizados 8 indicadores de extremos climáticos baseados em dados de precipitação diária, assim como apresentados na Tabela 1.

Para fins de comparação e quantificação de destreza, os 8 indicadores climáticos apresentados na Tabela 1 foram determinados a partir dos dados de precipitação provenientes do CPC e dos modelos Eta e HadGEM2-ES.

2.5. Validação dos modelos do sistema terrestre HadGEM2-ES e regional Eta

Com o intuito de avaliar o desempenho dos modelos HadGEM2-ES e Eta em simular os indicadores climáticos, foram calculados o viés e o erro médio quadrático (RMSE). Uma vez que as simulações de controle dos modelos HadGEM2-ES e Eta foram realizadas para o período de 1961 a 2005, e os dados provenientes do CPC estarem disponíveis somente a partir do ano de 1979, a validação dos modelos foi realizada para o período de 1981 a 1990 (10 anos).

De maneira a analisar a destreza dos modelos para esse período, foram avaliadas as distribuições espaciais dos indicadores climáticos para a da bacia Amazônica. Os dados do CPC foram interpolados para a mesma grade do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES ($1,875^\circ \times$

Tabela 1 - Indicadores climáticos baseados na precipitação pluviométrica. Os índices i , j e w são, respectivamente, a quantidade diária de precipitação no dia, o período e a quantidade diária de precipitação em um dia úmido, I é o número de dias, w é o número de dias úmidos e RR indica a chuva acumulada em 1 dia.

Indicadores	Definição	Expressão	Unidade
CDD	Número de dias consecutivos secos	$RR_{ij} < 1 \text{ mm}$	Dias
CWD	Número de dias consecutivos chuvosos	$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm}$	Dias
NDD	Número total de dias secos	$RR_{ij} < 1 \text{ mm}$	Dias
NWD	Número total de dias chuvosos	$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm}$	Dias
PRCPTOT	Quantidade total de chuva	$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$	mm
R1D	Quantidade máxima de chuva ocorrida em 1 dia	$Rx1day_j = \max(RR_{ij})$	mm dia ⁻¹
R5D	Quantidade máxima de chuva ocorrida em 5 dias	$Rx5day_j = \max(RR_{ij})$	mm dia ⁻¹
P95%	Percentil de 95% de chuva	$P95p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj}$	mm

1,275°) e do modelo regional Eta (0,2° × 0,2°) para as análises individuais. Na avaliação quantitativa dos indicadores climáticos, foram empregadas as seguintes métricas estatísticas: viés Eq. (1) e RMSE Eq. (2). Esses métodos estatísticos foram aplicados com base nos indicadores climáticos, selecionados na Tabela 1, relativos à média anual.

O viés é uma expressão estatística que indica erro sistemático. Isto é, o quanto os resultados baseados nas simulações se afastam das observações (Lehmann e Casella, 1998). No presente trabalho, essa métrica é utilizada para averiguar a capacidade dos modelos HadGEM2-ES e Eta em simular os indicadores climáticos. O viés é definido por:

$$\text{VIÉS} = \bar{M} - \bar{O} \quad (1)$$

onde \bar{M} representa o valor médio anual dos dados derivados dos modelos e \bar{O} denota o valor médio anual dos dados das observações provenientes do CPC.

O segundo método estatístico utilizado na validação é o RMSE, que expressa o quanto as simulações oriundas de um modelo são precisas em relação aos dados observados (Lehmann e Casella, 1998). A partir da métrica avaliada no presente trabalho, quanto mais próximo de zero

for o valor do RMSE, mais próximo das observações será o resultado do modelo. O RMSE pode ser dado por:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left(\frac{\sum_i (M - O)^2}{N}\right)} \quad (2)$$

onde N é o número total da série, M representa o valor anual dos dados derivados dos modelos e O denota o valor anual dos dados observados.

3. Resultados

3.1. Validação baseada no viés

3.1.1. Modelo HadGEM2-ES

Avaliar o desempenho dos modelos climáticos para o clima atual, tendo como base indicadores climáticos, atribui confiança na detecção de possíveis mudanças no clima futuro. Para tanto, o viés dos indicadores climáticos relativo ao modelo HadGEM2-ES é apresentado na Fig. 1. Observa-se que o modelo HadGEM2-ES produz altos valores de CDD (número de dias consecutivos secos), quando comparado as observações, em grande parte do estado do Pará, sudoeste do Amazonas e leste do Mato Grosso (Fig. 1a). Este resultado indica que sobre estas regiões, em particular, o modelo tende a produzir extremos secos mais prolongados. Sobre a região central da bacia Amazônica, por outro lado, o modelo HadGEM2-ES produz baixos valores de CDD, indicando que o mesmo produz extremos de seca menos intensos em relação as observações.

A Fig. 1c apresenta o número total de dias secos (NDD) produzido pelo modelo HadGEM2-ES. Nota-se que o HadGEM2-ES aumentou o número total de dias secos no litoral do Brasil e nordeste do Pará. Isso demonstra que o modelo produz, em média, menos chuva do que se observa. Opostamente, na maior parte da AS, o HadGEM2-ES produz valores mais baixos de NDD, principalmente na bacia Amazônica. Este resultado sugere que, nessa região, o modelo produz mais chuva do que se observa.

Outros indicadores importantes no estudo de mudanças no clima são relativos ao CWD (número de dias consecutivos chuvosos) e NWD (número total de dias chuvosos). As Figs. 1b e 1d, mostram, respectivamente, os resultados para estes indicadores. Nota-se valores positivos em praticamente toda a América do Sul, com máximos valores sobre a região Amazônica. Estes resultados apontam que, nestas áreas, o modelo produz maiores valores de acumulados chuvosos, além de intensificar os extremos chuvosos. Desvios negativos de CWD e NWD, relativas ao HadGEM2-ES, por outro lado, são observadas em uma estreita faixa costeira no leste da América do Sul. De maneira geral, os resultados indicam que, em grande parte

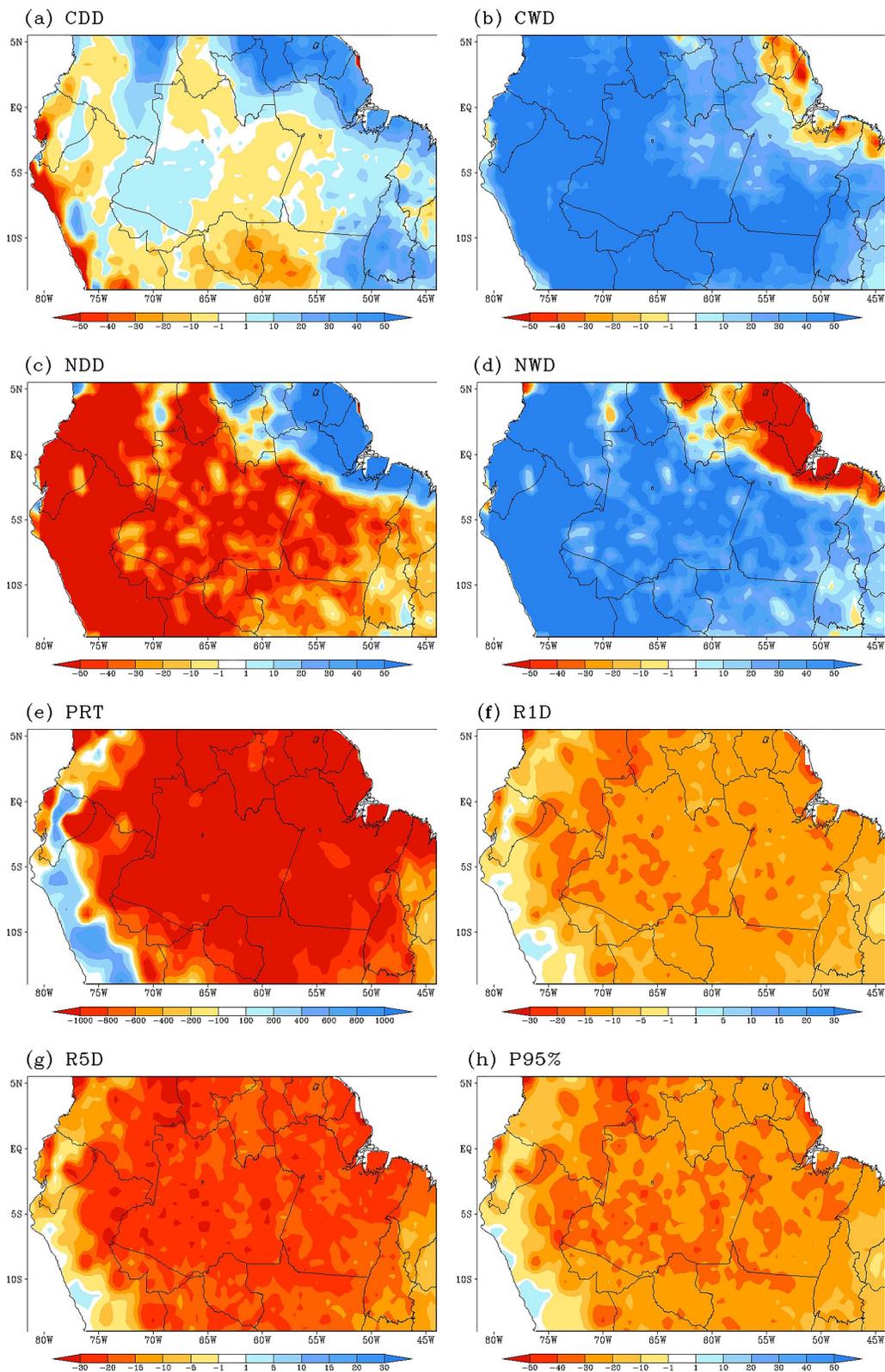


Figura 1. - Viés dos indicadores climáticos do CPC versus HadGEM2-ES, média anual, para o período de 1981 a 1990. (a) Número de dias consecutivos secos (dias) - CDD, (b) Número de dias consecutivos chuvosos (dias) - CWD, (c) Número total de dias secos (dias) - NDD, (d) Número total de dias chuvosos (dias) - NWD, (e) Quantidade total de chuva (mm) - PRECPTOT, (f) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 1 dia (mm dia⁻¹) - R1D, (g) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 5 dias (mm dia⁻¹) - R5D e (h) Percentil de 95% de chuva (mm) - P95%.

da bacia Amazônica, o HadGEM2-ES produz maiores valores de CWD e NWD e apresenta tendência em diminuir os valores dos indicadores associados a dias secos (CDD e NDD).

A média anual do indicador PRCPTOT (quantidade total de chuva) produzida pelo modelo HadGEM2-ES é apresentada na Fig. 1e. Observa-se que o modelo apresenta tendência de redução do volume chuvoso em praticamente toda a AS, abrangendo todo o território brasileiro, com máximos negativos sobre a bacia Amazônica (acima de 1000 mm na média). Nota-se, no entanto, que sobre a bacia Amazônica o modelo produz maiores valores do CWD e NWD (Figs. 1a, d), esperando desta forma aumento na quantidade total de chuva. Por outro lado, estes indicadores não influenciam os valores da precipitação total acumulada. Isto pode estar associado ao fato de que, apesar de o modelo HadGEM2-ES produzir maior número de dias chuvosos, o mesmo deve produzir menores quantidades de chuva.

A partir das Figs. 1f-h, observa-se que para os indicadores R1D, R5D e P95%, respectivamente, o modelo HadGEM2-ES apresenta tendências negativas de acumulados chuvosos associado a extremos de chuva em todo o território Brasileiro em grande parte da América do Sul, onde máximos valores negativos, em geral, ocorrem principalmente sobre a bacia Amazônica, principalmente para o R5d. Esses resultados mostram que, sobre a bacia Amazônica, apesar do número de dias chuvosos ser maior, o modelo produz menores volumes de precipitação associados aos eventos extremos.

3.1.2. Modelo Eta

O presente trabalho usou o modelo regional Eta cujas simulações utilizaram as condições de contorno do HadGEM2-ES. Usar o modelo Eta permite um maior detalhamento espacial dos indicadores climáticos, apresentados na sequência. A Fig. 2 apresenta o viés calculado para a média anual dos indicadores climáticos da Tabela 1. Nota-se, a partir das Figs. 2a e 2c que o modelo produz maiores valores de CDD e NDD em parte do Maranhão e norte da AS, incluindo a bacia Amazônica. Por outro lado, existe tendência do modelo produzir menores valores de CDD e NDD na região sul e oeste da bacia Amazônica. Padrão semelhante, no caso do modelo HadGEM2-ES, é observado na região central do Brasil. Estes resultados indicam que nos setores onde há valores positivos de CDD o modelo produz menores valores de chuva.

Nota-se também que o modelo Eta superestima o número total de dias consecutivos chuvosos sobre o setor oeste da bacia Amazônica (Fig. 2b), onde são observados máximos valores em torno da região conhecida como “Cabeça do Cachorro” localizada a noroeste do estado do Amazonas, que é climatologicamente a região que apresenta o maior volume chuvoso anual na Amazônia (Figueiroa e Nobre, 1990). No setor leste e extremo norte do

Brasil o modelo produz menores valores de NWD em relação as observações (Fig. 2b). Em relação ao modelo HadGEM2-ES, este índice apresenta ligeiras diferenças. No caso do modelo Eta, há maiores contrastes (leste-oeste) entre estes indicadores, enquanto que no HadGEM2-ES este contraste é nitidamente menor.

Valores negativos do número total de dias chuvosos são observados em parte do setor nordeste do Brasil e extremo norte do continente, indicando que o modelo Eta tende a produzir menores volumes chuvosos (Fig. 2d). Isto está de acordo com o apresentado na Fig. 2e, a qual mostra que a quantidade de chuva produzida pelo Eta, nessas regiões, é menor do que nas observações. Este padrão de NWD produzido pelo modelo Eta é similar ao resultado encontrado na Fig. 1d proveniente do modelo HadGEM2-ES. Em relação as demais regiões da bacia Amazônica, o modelo regional Eta superestima o número total de dias chuvosos, principalmente no setor centro/oeste da bacia. Para essas regiões, além do modelo Eta superestimar o número de dias chuvosos (CWD e NWD), ele também produz maior quantidade de chuva (Fig. 2e). Estes resultados estão de acordo com Shi *et al.* (2000), os quais apontaram máxima precipitação média anual, variando entre 1750 a 2450 mm, para o mesmo setor (centro/oeste da bacia).

Nos indicadores de extremos R1D, R5D e P95% apresentados na Fig. 2f-h, notam-se semelhanças, no que diz respeito à distribuição espacial e em alguns casos de máximos valores nestes indicadores. Estes resultados têm em comum que o modelo Eta possui a tendência de produzir acumulados chuvosos (associados a eventos extremos) menores do que se observa, sobretudo na maior parte da bacia Amazônica. Regiões com maiores acumulados chuvosos associados a eventos extremos são mais esparsas e pontuais. No entanto, ocorrem praticamente nos mesmos locais, independentemente de índice (R1D, R5D e P95%).

De maneira geral, ao se comparar os resultados do viés dos modelos HadGEM2-ES e Eta, para a bacia Amazônica, nota-se que os modelos possuem diferenças na distribuição espacial de valores negativos e positivos dos indicadores CDD e PRCPTOT. Em contrapartida, para os demais indicadores, ambos os modelos apresentam semelhança. Isto indica que o modelo HadGEM2-ES, aninhado com o modelo regional Eta, poderia ser utilizado para o estudo da maioria dos indicadores climáticos. No entanto, ainda assim, se faz necessário utilizar o modelo Eta, uma vez que o mesmo apresenta resolução espacial maior, dando assim maiores detalhes do padrão espacial dos indicadores climáticos.

3.2. Validação baseada no RMSE

3.2.1. Modelo HadGEM2-ES

O RMSE para os indicadores climáticos é apresentado na Fig. 3. Observa-se que os valores do CDD são

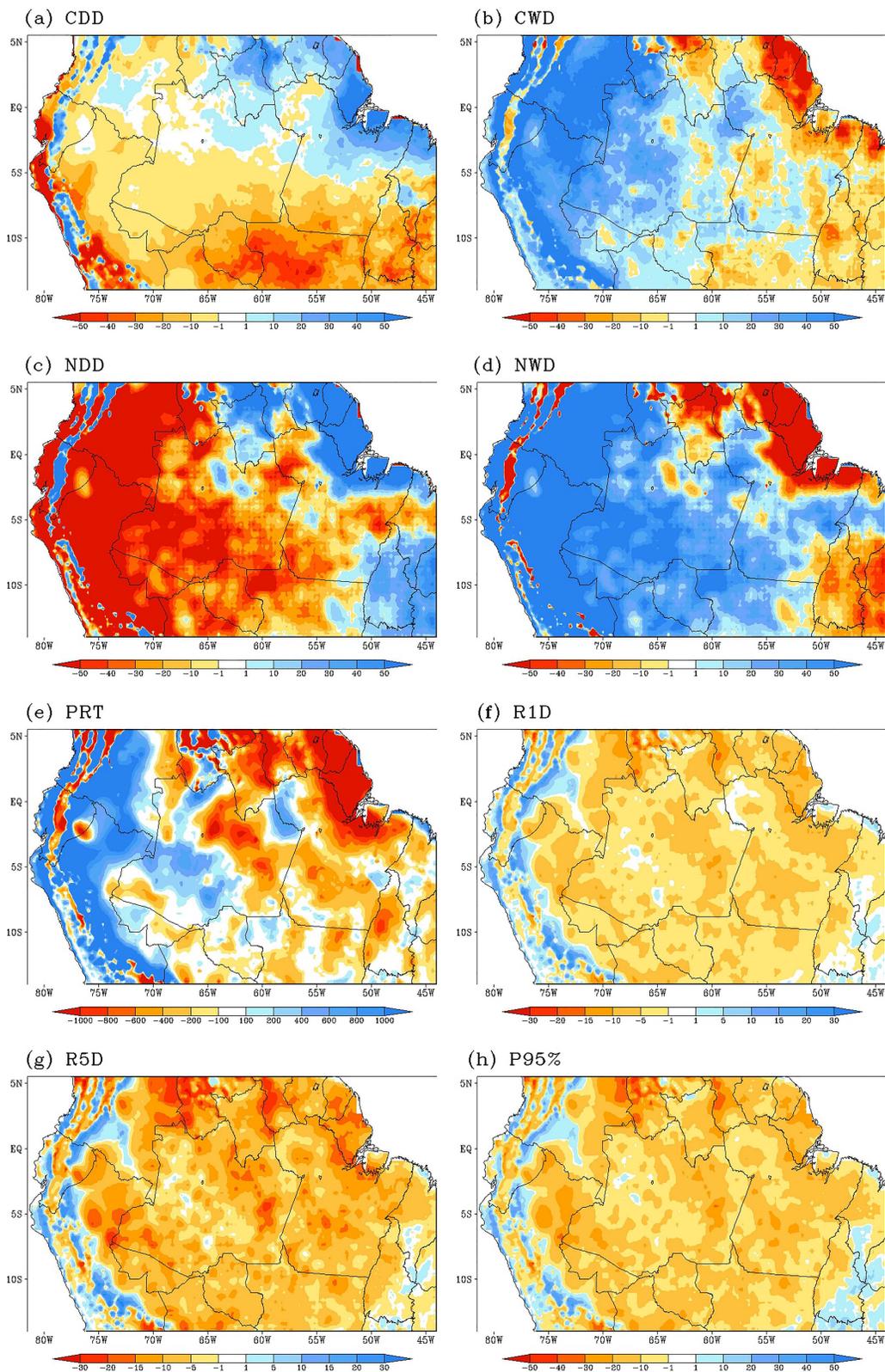


Figura 2. - Viés dos indicadores climáticos do CPC versus Eta, média anual para o período de 1981 a 1990. (a) Número de dias consecutivos secos (dias) - CDD, (b) Número de dias consecutivos chuvosos (dias) - CWD, (c) Número total de dias secos (dias) - NDD, (d) Número total de dias chuvosos (dias) - NWD, (e) Quantidade total de chuva (mm) - PRECPTOT, (f) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 1 dia (mm dia⁻¹) - R1D, (g) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 5 dias (mm dia⁻¹) - R5D e (h) Percentil de 95% de chuva (mm) - P95%.

mínimos na maior parte da bacia Amazônica (Fig. 3a). Este resultado indica que o modelo HadGEM2-ES possui boa precisão em simular este indicador de extremo climático, principalmente ao norte do Estado do Amazonas, onde os valores de RMSE são próximos de zero. Por outro lado, o modelo apresenta relativamente baixa previsibilidade na região próxima ao nordeste do Brasil.

Em relação aos demais indicadores apresentados nas Figs. 3b-f, observa-se que o modelo não é preciso na simulação dos indicadores baseados nas observações, assim como foi para o CDD. Isso é notável na Fig. 3b, onde o HadGEM2-ES apresenta valores máximos de RMSE, principalmente ao sul e oeste da bacia Amazônica, indicando que o modelo possui baixa eficácia para simular o número de dias consecutivos chuvosos para a bacia Amazônica. Isso também é observado em relação aos indicadores NDD e NWD, Figs. 3c-d, respectivamente. Os valores de RMSE desses indicadores são altos na maior parte da bacia Amazônica, indicando baixa precisão do modelo nessa região. Observa-se, por outro lado, que os valores de RMSE dos indicadores NDD e NWD são semelhantes em termos de posição dos núcleos de máximos e mínimos valores. Isso ocorre porque ao se calcular a subtração na Eq. 3, para o NDD e o NWD, ambos indicadores possuirão valores iguais, porém, com sinais opostos. Ou seja, para cada ponto de grade, quando o resultado da subtração de NDD for um valor com sinal negativo, o resultado da subtração de NWD terá o mesmo valor, no entanto, com sinal positivo. Dessa forma, ao aplicar-se o quadrado na Eq. 3, os valores com sinal negativo tornam-se positivos, então o restante do cálculo terá o mesmo resultado para os dois indicadores.

Para o caso do índice PRCPTOT (Fig. 3e), nota-se que os valores de RMSE são máximos, sobretudo, sobre o estado do Amazonas e extremo norte do estado do Pará. Estes resultados sugerem incertezas na simulação do modelo em relação às observações. Essa deficiência não é notada em parte dos estados de Tocantins e Maranhão, onde a tendência do modelo HadGEM2-ES em simular as observações é relativamente melhor que nas demais regiões do Brasil. As mesmas características são observadas nos indicadores associados a extremos como o R1D, R5D e P95% (Figs. 3f-h, respectivamente), os quais apresentaram baixa previsibilidade na bacia Amazônica, com valores distantes de zero. Comparando somente os três indicadores associados a extremos, o R1D (Fig. 3f) é o indicador melhor representado pelo modelo. No que diz respeito aos R5D e P95%, os resultados apresentam variações espaciais relativamente semelhantes, onde máximos valores de RMSE ocorrem em praticamente toda a bacia Amazônica, sugerindo baixa previsibilidade do modelo em relação às chuvas extremas.

3.2.2. Modelo Eta

A partir da Fig. 4a, os resultados mostram que os valores do CDD são mínimos na região da “Cabeça do Cachorro”, como também em parte do estado do Amazonas. Isso indica que o modelo Eta é relativamente eficaz para simular este indicador nesta região. De forma que o modelo captou o mesmo padrão espacial que o HadGEM2-ES nas regiões onde os valores de RMSE foram satisfatórios em relação às observações. Isto indica que ambos os modelos simularam bem o número de dias consecutivos secos para o estado do Amazonas. Outro indicador climático que o modelo Eta apresenta eficácia, na maior parte da bacia Amazônica, é o R1D (Fig. 4f), que foi o melhor entre os três indicadores associados a chuva produzida por eventos extremos (Fig. 4f-h, respectivamente). Este resultado indica eficiência do modelo no que concerne à simulação do mesmo, principalmente, na região que vai do noroeste a sul do estado do Amazonas (região onde os valores de RMSE são mínimos).

Para os demais indicadores, assim como foi observado no HadGEM2-ES, o modelo Eta também possui pouca acurácia. Na Fig. 4b, observa-se que o modelo Eta apresenta bom desempenho para simular o número consecutivo de dias chuvosos sobre a bacia Amazônica, com exceção da nascente da bacia na Cordilheira dos Andes (mais precisamente no Peru) e nordeste do estado do Pará, onde o modelo apresenta baixa precisão.

Nas Figs. 4c-d os valores dos indicadores NDD e NWD, respectivamente, são máximos no setor oeste da bacia Amazônica, sudoeste do Amazonas e nordeste do Pará, indicando pouca acurácia do modelo nessas regiões. Nas demais áreas da bacia Amazônica os valores do RMSE são menores e estão associados a um melhor desempenho do modelo Eta. Observa-se que, assim como no caso dos indicadores NDD e NWD do modelo Eta (Fig. 4c-d), os valores de RMSE do modelo HadGEM2-ES, para os mesmos indicadores, são também similares.

Para o índice PRCPTOT (Fig. 4e), a distribuição espacial do RMSE é bem homogênea, apresentando valores máximos sobre a bacia Amazônica. Estes resultados sugerem maiores incertezas na simulação do modelo nessa região. Nas demais regiões, como o centro/sul e o nordeste do Brasil, os valores de RMSE são relativamente menores, o que é devido à maior precisão.

Em geral, observa-se que entre os oito indicadores avaliados, o modelo Eta apresentou melhor desempenho em apenas dois, sendo eles: o CDD (Fig. 4a) e o R1D (Fig. 4f). Diferentemente, o HadGEM2-ES apresentou melhor desempenho apenas para o índice CDD (Fig. 1a). De forma que, para os oito indicadores climáticos, o desempenho do modelo ETA foi mais eficiente do que o desempenho do HadGEM2-ES.

Para os demais indicadores, os valores de RMSE são máximos na bacia Amazônica, indicando pouca acurácia

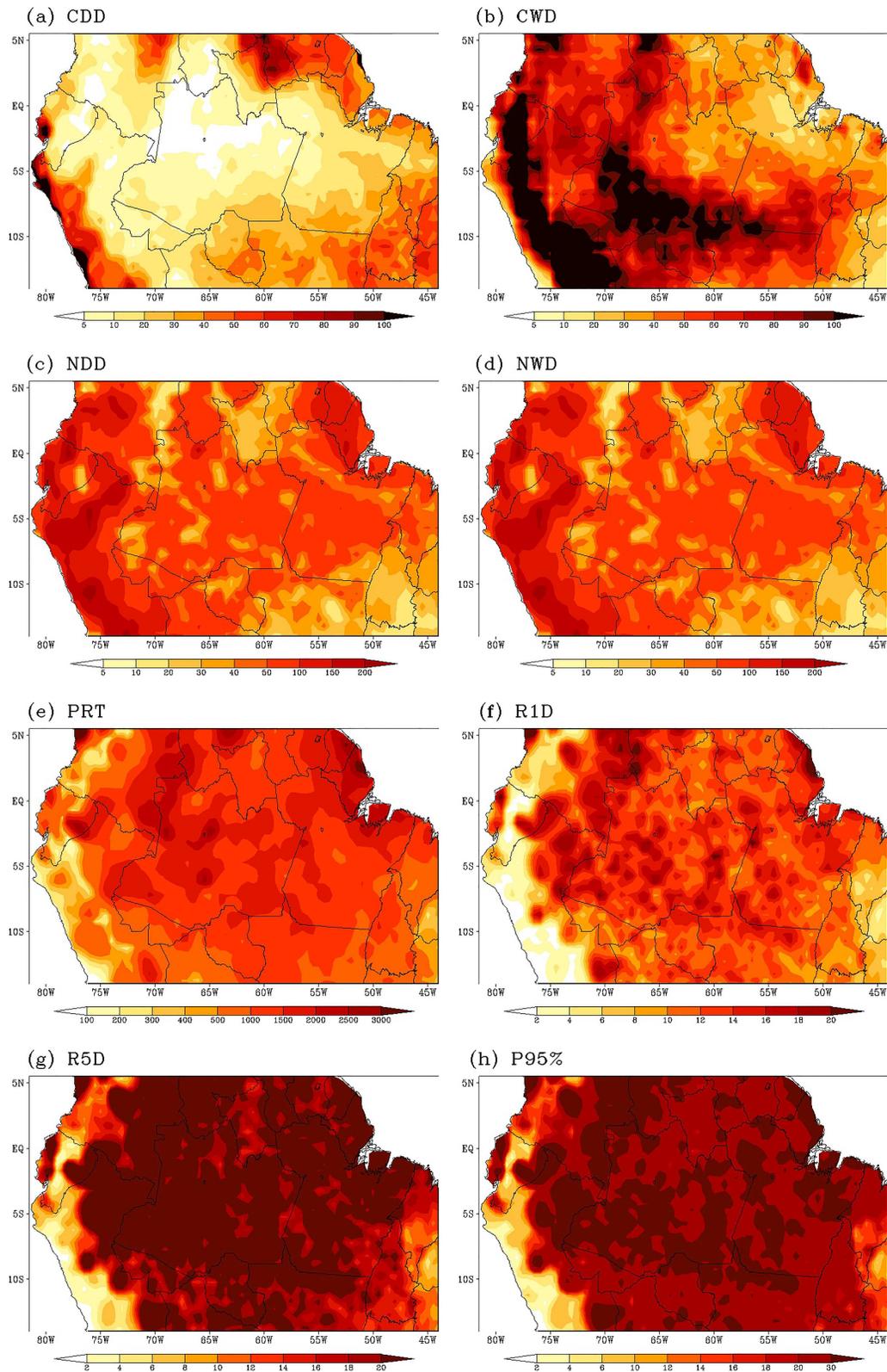


Figura 3. - RMSE dos indicadores climáticos do CPC versus HadGEM2-ES, média anual para o período de 1981 a 1990. (a) Número de dias consecutivos secos (dias) - CDD, (b) Número de dias consecutivos chuvosos (dias) - CWD, (c) Número total de dias secos (dias) - NDD, (d) Número total de dias chuvosos (dias) - NWD, (e) Quantidade total de chuva (mm) - PRECPTOT, (f) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 1 dia (mm dia⁻¹) - R1D, (g) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 5 dias (mm dia⁻¹) - R5D e (h) Percentil de 95% de chuva (mm) - P95%.

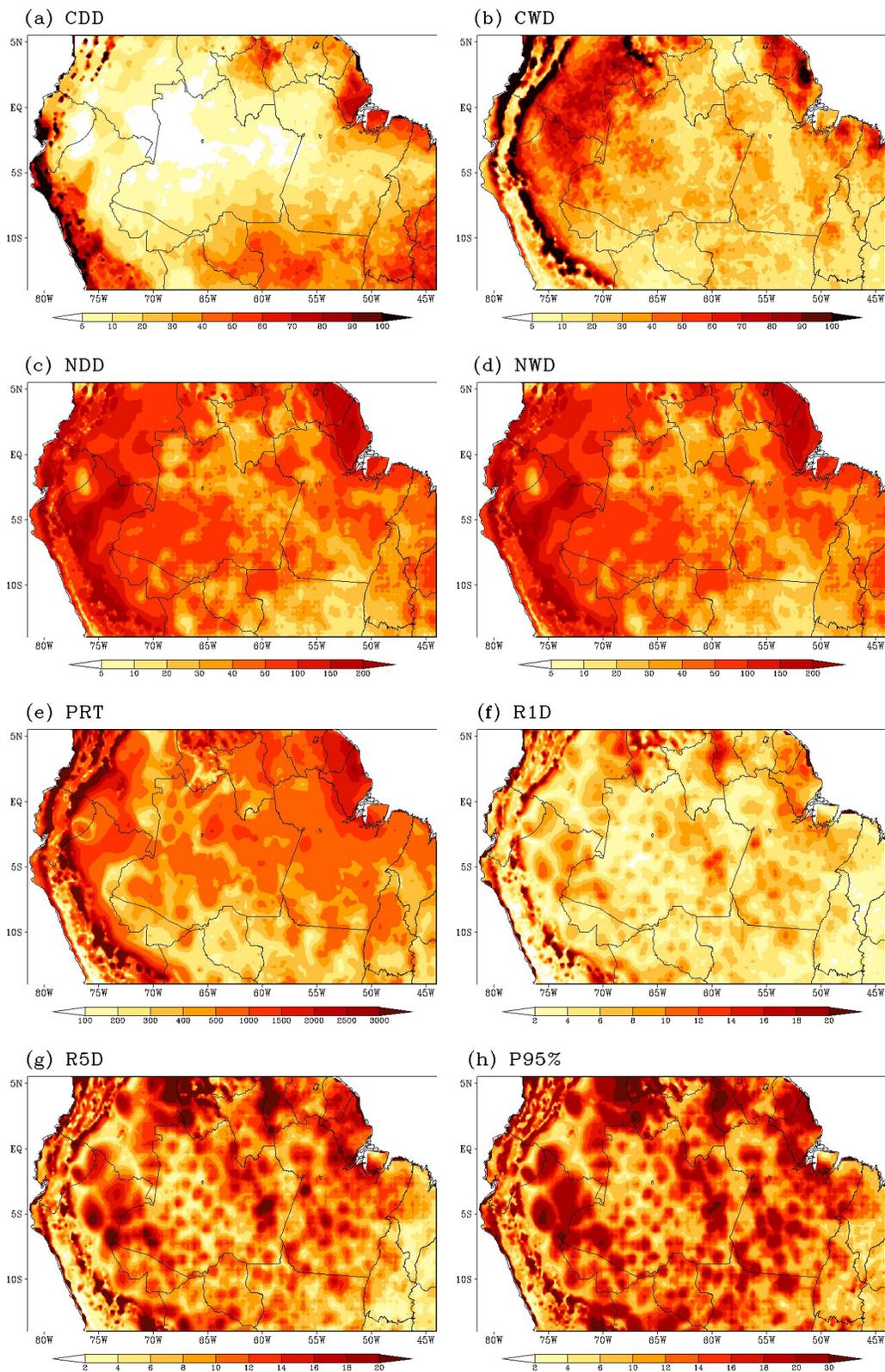


Figura 4. - RMSE dos indicadores climáticos do CPC versus Eta, média anual para o período de 1981 a 1990. (a) Número de dias consecutivos secos (dias) - CDD, (b) Número de dias consecutivos chuvosos (dias) - CWD, (c) Número total de dias secos (dias) - NDD, (d) Número total de dias chuvosos (dias) - NWD, (e) Quantidade total de chuva (mm) - PRECPTOT, (f) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 1 dia (mm dia⁻¹) - R1D, (g) Quantidade máxima de chuva ocorrida em 5 dias (mm dia⁻¹) - R5D e (h) Percentil de 95% de chuva (mm) - P95%.

deste modelo. Desta maneira, como o modelo HadGEM2-ES foi utilizado para forçar o modelo Eta, espera-se que o HadGEM2-ES influencie nas simulações do Eta através das fronteiras. Ou seja, o modelo regional Eta também apresenta pouca acurácia no que diz respeito ao CWD, NDD, NWD, PRCPTOT, R5D e P95%. No entanto, o modelo que melhor representou os 8 indicadores de extremos climáticos selecionados foi o modelo Eta. Isso é, para esse estudo, notou-se que o modelo de maior resolução foi mais eficiente para simular as observações. Isso foi observado nas Figs. 3 e 4, devido os valores de RMSE para o HadGEM2-ES serem maiores que o Eta. Este resultado pode estar relacionado às diferenças físicas e dinâmicas entre os modelos, como por exemplo, o modelo Eta possui resolução espacial maior que o HadGEM2-ES, o que permite descrever condições meteorológicas em escalas menores. Isso é importante principalmente para a bacia Amazônica, onde os processos meteorológicos que provocam chuvas ocorrem da pequena a grande escala (Reboita *et al.* 2010).

4. Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo principal quantificar e avaliar a destreza do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES e do modelo regional Eta em simular oito indicadores climáticos baseados em dados de precipitação. Para efeito de comparação com as observações, foi utilizada a base de dados do CPC para um período de 10 anos (1981 a 1990), comumente utilizado como clima presente em estudos de mudanças climáticas. Para se avaliar aspectos gerais, os indicadores climáticos foram calculados em termos da média anual. Foram, então, utilizados dois métodos estatísticos, o viés e o RMSE, para quantificar a performance dos modelos.

Observou-se que os modelos superestimam o número de dias chuvosos consecutivos e não consecutivos (CWD, NWD) e subestimam o número total de dias secos (NDD). Isso ocorre principalmente na região oeste da bacia Amazônica, onde, de acordo com as observações, os valores para esses indicadores são máximos. Isto mostra que o modelo produz mais dias com chuva do que realmente ocorre. No entanto, apesar do HadGEM2-ES produzir acréscimo nos dias chuvosos consecutivos e não consecutivos, a quantidade total de chuva produzida na bacia Amazônica é reduzida. A mesma condição não é observada nas simulações com o modelo Eta, que produz maior quantidade de chuva a oeste da bacia, mesma região onde estão localizados os valores máximos de CWD e NWD. Em relação aos indicadores associados a eventos extremos de chuva (R1D, R5D e P95%), notou-se que ambos os modelos tendem a subestimar a quantidade de chuvas extremas. Porém, os valores máximos negativos para o viés desses indicadores são maiores no HadGEM2-

ES, mostrando que o modelo Eta apresenta melhor performance para simular as chuvas extremas.

Na validação baseada no RMSE, observou-se que para a bacia Amazônica, ambos os modelos possuem precisão satisfatória para simular o número de dias consecutivos secos em comparação aos demais indicadores. Além deste indicador, o modelo Eta simulou adequadamente a quantidade máxima de chuva ocorrida em um dia. Em relação aos demais indicadores de extremos climáticos, os modelos HadGEM2-ES e Eta apresentaram performance relativamente baixa ao apresentarem altos valores de RMSE. Todavia, comparando o RMSE do modelo Eta com o do modelo HadGEM2-ES, notou-se que o Eta apresentou melhores resultados para todos os indicadores.

É natural que as simulações do HadGEM2-ES tenham efeito sobre a qualidade das simulações do modelo Eta, e apesar de ambos modelos apresentarem semelhanças em alguns indicadores climáticos, em outros, os padrões tendem a apresentar diferenças. Isto se deve à distinção das estruturas físicas e dinâmicas de ambos os modelos. Considerando os resultados obtidos, o uso de outros modelos globais como condição de fronteira para o modelo Eta é recomendado. Principalmente para efeito de comparação, possibilitando melhorias no que se refere às simulações dos indicadores, sobretudo aos associados a eventos extremos que, na bacia Amazônica, tem grande relevância em questões socioeconômicas. Os resultados obtidos neste trabalho, apresentam implicações em estudos de quantificação de mudanças nos valores dos indicadores climáticos em cenários de mudanças climáticas do IPCC, como por exemplo, aumento ou redução na intensidade e frequência de eventos extremos de chuva e consequentemente, cheias e secas mais intensas.

Referências

- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B. *et al.* Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 1-22, 2006.
- ARAÚJO, F.R.C.D.; SANTOS, C.A.C.; NASCIMENTO, F.D.C. Estudos dos índices extremos de temperatura na bacia hidrográfica do baixo rio Colorado, EUA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 29-36, 2015.
- BETTS, A.K.; MILLER, M.J. A New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests Using GATE Wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air-Mass Data Sets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, p. 693-709, 1986.
- CHEN, M.; SHI, W.; XIE, P.; SILVA, V.B.S.; KOUSKY, R.; HIGGINS, R.W.; JANOWIAK, J.E. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, p. 1-13, 2008.
- CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J.L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South

- America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537-555, 2005.
- CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.F. *et al.* Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 635-653, 2012.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I. *et al.* Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014.
- COLLINS, W.J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY N.; HALLORAN, P. *et al.* Development and Evaluation of an Earth System Model HadGEM. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 997-1062, 2011.
- CORREIA, F.W.S.; MANZI, A.O.; CÂNDIDO, L.A.; DOS SANTOS, R.M.N.; PAULIQUEVIS, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007.
- COX, P.M. **Description of the "TRIFFID" dynamic global vegetation model**. London Road: Hadley Centre, 2001. (Technical Note, 24).
- EK, M.B.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J.D. Implementation of NOAA land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta Model. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 108, p. 1-16, 2003.
- ESPINOZA, J.; MARENGO, J.; RONCHAIL, J.; CARPIO, J.; FLORES, L.; GUYOT, L. The extreme 2014 flood in South-Western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, p. 1-9, 2014.
- FELS, S.B.; SCHWARZKOPF, M.D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, p. 1475-1488, 1975.
- FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. 5, p. 36 - 45, 1990;
- GADD, A.J. A split-explicit integration scheme for numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 104, p. 569-582, 1978.
- HAYLOCK M.R.; PETERSON T.; ALVES L.M.; AMBRIZZI T.; ANUNCIACÃO Y.M.T. *et al.* Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.
- 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. *et al.* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 1535 p., 2013.
- KARL, T.; NICHOLLS, N.; GHAZI, A.; Clivar/Gcos/Wmo Workshop on indices and indicators for climate extremes. **Climatic Change**, v. 42, p. 3-7, 1999.
- LACIS, A.A.; HANSEN, J.E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, 1974.
- LEHMANN, E.L. e CASELLA, G. **Theory of Point Estimation**. Springer, New York, 2nd ed. 519 p., 1998.
- MARENGO, J.A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 79-96, 2004.
- MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Clima da Região Amazônica. In: Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N.J.; da Silva, M.G.A.J.; Silva Dias, M.A.F. (Orgs.). **Tempo e Clima no Brasil**. Oficina de Textos: São Paulo, p. 197-212, 2009.
- MARENGO, J.A. e ESPINOZA, J.C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal Climatolgy**, v. 36, n. 36, p. 1033-1050, 2015.
- MARTIN, G.M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W.J.; CULVERWELL, I.D.; HALLORAN, P.R. *et al.* The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 723-757, 2011.
- MELLOR, G.L.; YAMADA, T. A hierarchy of turbulence closure models for boundary layers. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 1791-1806, 1974.
- MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, p. 195-202, 1984.
- MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BAS-TOS, P. *et al.* "An upgraded version of the Eta Model". **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63-79, 2012.
- NICHOLLS, N. and L. ALEXANDER, L. Has the climate become more variable or extreme? Progress 1992-2006. **Progress in Physical Geography**, v. 31, p. 1-11, 2007.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil/Edmon Nimer**. Rio de Janeiro: IBGE, v. 4, 421 p., 1979.
- O'CONNOR, F.M.; JOHNSON, C.E.; MORGENSTERN, O.; ABRAHAM, N.L.; BRAESICKE, P. *et al.* Evaluation of the new UKCA climate-composition model - Part 2: The Troposphere. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 6, p. 1743 - 1857, 2013.
- PALMER, J.R.; TOTTERDELL, I.J. Production and export in a global ocean ecosystem model. Deep Sea Research Part I. **Oceanographic Research Papers**, v. 48, n. 5, p. 1169-1198, 2001.
- PETERSON, T. C.; FOLLAND, C.; GREUZA, G.; HOGG, W.; MOKSSIT, A.; PLUMER, N. **Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs**. Geneva: WMO, 1 ed., 117 p., 2001.
- REBOITA, M.S., GAN, M.A., ROCHA, R.P., AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.
- SESTINI, M.F.; ALVALÁ, R.C.S.; MELLO, E.M.K.; VALERIANO, D.M.; CHOU, S.C.; NOBRE, C.A.; PAIVA, J.A.C.; REIMER, E.S. **Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 74 p., 2002.
- SHI, W.; HIGGINS, R.W.; YAROSH, E.; KOUSKY, V.E. The Annual Cycle and Variability of Precipitation in Brazil. **NCEP/Climate Prediction Center Atlas n° 9**, 2000.

- Disponível em: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/research_papers/ncep_cpc_atlas/9/toc.html Acesso em: 20 oct. 2017.
- SILVA, J.S. **Altimetria espaciais em zonas úmidas da bacia Amazônica - Aplicações hidrológicas**. Saarbrücken (GE): Édition Universitaires Européennes, 350 p., 2010.
- SKANSI, M.M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; GROENING, J.A.A. *et al.* Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295-307, 2013.
- VALVERDE, M.C. e MARENGO, J.A. Extreme rainfall indices in the hydrographic basins of Brazil. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 4, n. 1, p. 10-26, 2014.
- ZHANG, X., YANG, F.R. **ClimDex (1.0) User Guide**. Climate Research Branch Environment Canada. Downsview: Canada, 22 p., 2004.
- ZHAO, Q.; BLACK, T.L.; BALDWIN, M.E. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta model at ncep. **Weather and Forecasting**, v. 12, p. 697-712, 1997.
- ZIN, W.Z.W.; JAMALUDIN, S.; DENI, S.M.; JEMAIN, A.A. Recent changes in extreme rainfall events in Peninsular Malaysia: 1971-2005. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 303-314, 2010.
- ZWIERS, F.W.; ALEXANDER, L.V.; HEGERL, G.C.; KNUTSON, T.R.; KOSSIN, J.P. *et al.* Climate Extremes: Challenges in estimating and understanding recent changes in the frequency and intensity of extreme climate and weather events. **Climate Science for Serving Society: Research, Modelling and Prediction Priorities**, G.R. Asrar and J.W. Hurrell, eds. Springer: Dordrecht, p. 339-389, 2012.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.