Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO SOBRE A AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA: CLIMA ATUAL E PROJEÇÕES FUTURAS USANDO O MODELO REGCM4

DE SOUZA, Everaldo Barreiros – everaldo.barreiros.souza@itv.org
Pesquisador Associado – Instituto Tecnológico Vale (ITV), Belém-PA

CARMO, Alexandre Melo Casseb – acasseb@ufpa.br
Professor Associado – Universidade Federal do Pará (UFPA), IG/FAOC, Belém-PA

MORAES, Bergson Cavalcante – bergson.moraes@itv.org
Pesquisador Adjunto – Instituto Tecnológico Vale (ITV), Belém-PA

NACIF, Adelaide – adelaide.nacif@sudam.gov.br
Geógrafa – Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), Belém-PA

FERREIRA, Douglas Batista da Silva – douglas.silva.ferreira@itv.org
Pesquisador Assistente – Instituto Tecnológico Vale (ITV), Belém-PA

ROCHA, Edson José Paulino – eprocha@ufpa.br
Professor Associado – Universidade Federal do Pará (UFPA), IG/FAMET/PPGCA, Belém-PA

SOUZA, Paulo Jorge de Oliveira Ponte – paulo.jorge@ufra.edu.br
Professor Adjunto – Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), ISARH, Belém-PA

RESUMO: Um downscaling dinâmico usando o modelo regional RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2 com cenário RCP45 do IPCC-AR4 foi conduzido para a Amazônia, com a finalidade de investigar os aspectos regionais da precipitação sazonal durante o clima atual (últimos 25 anos, 1989/2013) e clima futuro (próximos 25 anos, 2015/2039). As simulações para o clima atual indicaram que o modelo regional é capaz de simular as principais características da variabilidade espacial da precipitação nos quatro trimestres ao longo do ano, contudo apresenta erros sistemáticos ao longo da região, especialmente a subestimativa de precipitação na porção nordeste da Amazônia (Amapá e norte/nordeste do Pará) no período chuvoso. As projeções regionais mostram que as mudanças mais expressivas no clima futuro devem ocorrer no setor sudeste/leste da Amazônia com indicações de reduções de até 30% no volume de chuva do trimestre JJA numa grande área que abrange o norte do Mato Grosso e Tocantins, sudeste do Pará e leste do Maranhão.
PALAVRAS-CHAVE: Modelagem climática regional, Climatologia da Amazônia, Mudanças Climáticas, Downscaling dinâmico.

SEASONAL PRECIPITATION OVER THE BRAZILIAN LEGAL AMAZON: CLIMATE CURRENT AND FUTURE PROJECTIONS USING REGCM4 MODEL

ABSTRACT: A dynamical downscaling using RegCM4 regional model nested with HadGEM2 global model with RCP4.5 IPCC-AR4 scenario was conducted for the Amazon, in order to investigate the regional aspects of seasonal precipitation during the current climate (past 25 years, 1989/2013) and future climate (next 25 years, 2015/2039). The simulations for the current climate indicated that the regional model is able to simulate the main features of the spatial variability of precipitation during the four seasons throughout the year, but there are systematic errors along the region, especially the rainfall underestimation in northeastern Amazon (Amapá and north/northeast of Pará) in the rainy season. Regional projections show that the most significant changes in the future climate may occur in the southeastern/eastern Amazon with indications of up to 30% reductions in JJA rainfall volume over a large area covering the northern Mato Grosso and Tocantins, southeastern Pará and eastern Maranhão.
KEYWORDS: Regional climate model, Amazon climatology, Climate Change, Dynamical downscaling.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

1. INTRODUÇÃO

A precipitação pluviométrica é uma das variáveis mais importantes para a caracterização do clima, principalmente em regiões tropicais (DE SOUZA et al., 2009). Na distribuição espacial da precipitação climatológica anual (média 1982/2012) sobre a América do Sul (Figura 1a), destaca-se a Amazônia Legal Brasileira (área realçada com a linha preta) como a região que apresenta tanto a maior área espacial como a maior intensidade (entre 4 e 10 mm/dia) do volume pluviométrico sobre o continente. O comportamento do ciclo anual, considerando os valores mensais de precipitação sobre a Amazônia (média espacial), exibe sazonalidade pronunciada ao longo dos meses do ano, com os máximos (atingindo 9 mm/dia) ocorrendo em fevereiro e março e mínimos (entre 2,6 e 2,2 mm/dia) em julho e agosto (Figura 1b, barras cinzas). As médias sazonais de precipitação da Amazônia demonstram, claramente, que a estação chuvosa se processa durante os trimestres do verão e outono e a estação seca ou menos chuvosa no inverno e primavera (Figura 1b, barras azuis), cujo comportamento é condizente com as análises observacionais reportadas anteriormente por Figueroa e Nobre (1990), De Souza e Ambrizzi (2004) e Villar et al. (2009).

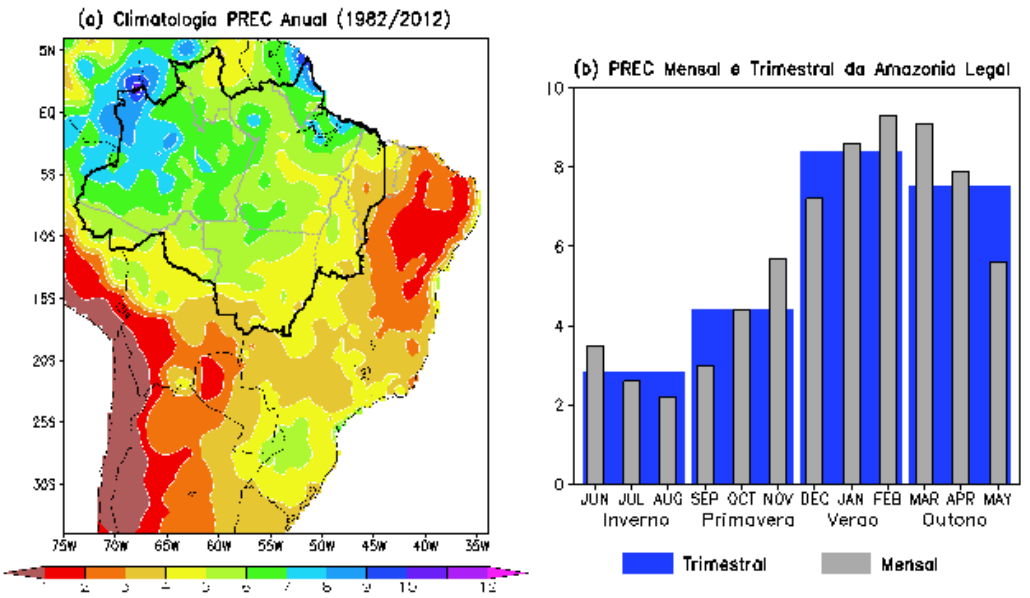

Figura 1. (a) Precipitação climatológica anual (média 1982/2012) sobre a América do Sul, baseada nos dados do CPC. A linha preta destaca a região da Amazônia Legal Brasileira. (b) Médias mensais e trimestrais de precipitação da Amazônia (média espacial). Unidade: mm/dia.

Estudos observacionais investigaram os padrões espaciais de precipitação nas escalas anual, sazonal e mensal sobre a Amazônia como um todo (FIGUEROA e NOBRE, 1990; VILLAR et al., 2009) ou em áreas específicas, como o estado do Pará (DE SOUZA et al., 2009; LOPES et al., 2013) e do Acre (DUARTE, 2006). Tais estudos reportaram a existência de alta variabilidade

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

pluviométrica espacial devido à manifestação conjunta ou não de diversos sistemas meteorológicos de escala local, meso, sinótica e grande escala. Essa complexidade intrínseca do comportamento da precipitação sobre a Amazônia é um desafio nos estudos científicos que usam a ferramenta de modelagem numérica global e regional.

Atualmente, é consenso na comunidade cientifica de que uma das ferramentas mais adequadas nos estudos de clima atual e futuro é o *downscaling* (regionalização) dinâmico (PBMC, 2013), cuja técnica consiste em usar um modelo regional aninhado a um modelo global. Basicamente, as saídas dos modelos globais com baixa resolução espacial (~ 100 a 200 km) são utilizadas como condições de fronteira dentro do modelo regional que realiza as simulações em alta resolução espacial (~ 25 a 50 km). Diversos estudos sugerem que o *downscaling* proporciona uma representação mais realística do clima onde fatores locais (proximidade com o oceano, topografia acentuada, solo e cobertura superficial heterogênea, etc), que são capturadas pelos modelos regionais, funcionam como importantes moduladores das condições de tempo e clima, adicionados aos fatores de grande escala (modulação dos oceanos e circulação geral da atmosfera) que são capturados pelos modelos globais (AMBRIZZI et al., 2007).

No presente trabalho utiliza-se o modelo climático regional (RegCM4), que tem sido aplicado em diversos estudos sobre a África, Ásia, Europa e Américas (Giorgi et al., 2012). Para a América do Sul, o RegCM4 tem sido usado em estudos climatológicos sobre o ciclo anual da precipitação e ciclo diurno da convecção, com as abordagens enfatizadas para o regime de verão associado à ZCAS nas regiões nordeste e sul/sudeste do Brasil e Oceano Atlântico subtropical (Cuadra e Rocha, 2006; Fernandez et al., 2006; Seth et al., 2007; Da Rocha et al., 2009; Reboita et al., 2010; Machado e Da Rocha, 2011; Da Rocha et al., 2012). Particularmente para a Amazônia, estudos recentes mostraram que o RegCM4 consegue capturar as principais características da variabilidade sazonal de precipitação do período chuvoso (De Souza et al., 2009).

O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo de *downscaling* dinâmico usando o RegCM4 sobre a região da Amazônia Legal Brasileira, com ênfase na caracterização espacial da precipitação climatológica sazonal durante o clima atual (média dos últimos 25 anos, 1989 a 2013), bem como reportar as projeções de mudanças da precipitação no clima futuro (médias dos próximos 25 anos, 2015 a 2039).

2. DADOS E METODOLOGIA

Os dados observacionais de precipitação consistem de médias mensais disponíveis numa grade sobre o Brasil com resolução horizontal de 0.5° (~ 55 km em latitude e longitude), os quais foram gerados através do sistema de análise de dados observacionais do *Climate Prediction Center* (CPC, NOAA-USA).

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Estes dados são baseados inteiramente nos registros das estações de superfície da rede meteorológica nacional e estadual (SILVA et al., 2007). Maiores detalhes sobre o controle de qualidade e sobre a técnica de análise objetiva e interpolação usados na geração da precipitação CPC podem ser encontrados em Chen et al. (2008). Estudos anteriores demonstraram a existência de consistência e correspondência alta entre os dados do CPC e dados derivados de estações convencionais individuais e estimativas de satélite sobre o território brasileiro (SILVA et al., 2007), inclusive na região amazônica (DE SOUZA et al., 2009).

Os aspectos de simulação do clima da Amazônia são baseados no *downscaling* dinâmico realizado com o modelo climático regional RegCM4 aninhado ao modelo global do HadGEM2, cujos detalhes encontram-se a seguir.

Utiliza-se a última versão do Sistema de Modelagem Climática Regional (RegCM4), cujo código fonte é de domínio público e é mantido em constante atualização pelo *International Centre for Theoretical Physics* – ITCP (http://gforge.ictp.it/gf/project/regcm/). O RegCM4 é a quarta geração de um modelo climático regional originalmente desenvolvido no NCAR (GIORGI e BATES, 1989; DICKINSON, 1989) e posteriormente aprimorado pelo ICTP (GIORGI et al., 1993a, 1993b; GIORGI e MEARNS, 1999; PAL et al., 2007). Atualmente, o ITCP RegCM4 é um modelo comunitário de área limitada, em coordenada vertical sigma-p e grade horizontal de Arakawa-B, com as equações primitivas para fluido compressível e hidrostático. Detalhes sobre a física do modelo, esquema de superfície, transferência radiativa, fluxos oceânicos e parametrizações de precipitação convectiva e de grande escala encontram-se completamente descritos em Giorgi et al. (2012). Usa-se a configuração do modelo proposta por Da Rocha et al. (2012) que implementaram modificações no esquema numérico de convecção Grell (período de tempo do disparo da convecção) e no modelo de superfície BATS (conteúdo de água no solo, condutividade hidráulica do solo). Tais modificações produziram simulações climáticas qualitativa e quantitativamente melhores do que estudos anteriores na caracterização do regime de verão e inverno do sul/sudeste do Brasil (DA ROCHA et al., 2009) e da Amazônia oriental (DE SOUZA et al., 2009). Este modelo regional foi instalado no Instituto Tecnológico Vale (ITV) usando o estado-da-arte em simulação computacional de alto desempenho através de um Cluster computacional com 196 processadores.

Os dados de entrada para uso no *downscaling* com o RegCM4 foram extraídos do modelo global denominado de *Hadley Centre Global Environmental Model version* 2 (HadGEM2, COLLINS et al., 2011) que usa o estado-da-arte em simulação numérica do sistema climático global. O HADGEM2 é um modelo acoplado com a componente atmosférica possuindo resolução horizontal de 1.25º em latitude e 1.875º em longitude, com 38 níveis verticais, e a componente oceânica tendo 1º em latitude e longitude com 40 níveis verticais. As saídas do modelo HADGEM2 foram preparadas para o *Coupled Model Intercomparison Project phase* 5 (CMIP5, dados disponíveis em http://cmip-

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

pcmdi.llnl.gov/cmip5) para compor o quinto relatório do IPCC-AR5 (*Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*) publicado em setembro de 2013. Tais dados gerados pelo HadGEM2 referem-se ao cenário futuro do IPCC-AR5 denominado de RCP 4.5 (*Representative Concentration Pathways*; VAN VUUREN et al., 2011) que é considerado intermediário em termos da forçante radiativa global de aproximadamente 4.5W/m^2 (~650 ppm de CO2 equivalente) até o ano de 2100.

As simulações regionais com o RegCM4 para o presente trabalho foram geradas num domínio centrado sobre a América do Sul tropical, em torno de 5ºS-58ºW (Figura 2b), utilizando a projeção Mercator normal com 217/133/18 pontos na direção zonal/meridional/níveis verticais, espaçamento de grade em torno de 28 km (0.25º) e passo de tempo de 30 minutos. O modelo foi inicializado com as condições de contorno laterais de 6/6 horas provenientes do modelo global HadGEM2 (com resolução de 1.25º x 1.875º que corresponde a 140 x 208 km; Figura 2a) para o período de 1981 a 2005 considerando o cenário de referência HIST (dados históricos) e de 2006 a 2040 considerando o cenário RCP4.5 do IPCC. Para a parametrização de convecção cumulus, usa-se a configuração mista com o esquema Grell (Grell, 1993) e fechamento Fritsch-Chappell sobre as áreas continentais e o esquema MIT-Emanuel (Emanuel e Zivkovic-Rothman, 1999) sobre as áreas oceânicas. A Figura 2c ilustra o domínio da grade horizontal destacado sobre a Amazônia Legal Brasileira, com a topografia do modelo em alta resolução, onde a caracterização espacial da precipitação sazonal será analisada.

A caracterização espacial da precipitação climatológica (observada pelos dados do CPC e simulada pelo RegCM4) sobre a Amazônia é baseada no cálculo e análise das médias dos últimos 25 anos (1989 a 2013) considerado como o clima atual e dos próximos 25 anos (2015 a 2039) considerado como clima futuro, sendo que a sazonalidade é avaliada nos quatro trimestres do ano: inverno (junho a agosto – JJA), primavera (setembro a novembro – SON), verão (dezembro a fevereiro – DJF) e outono (março a maio – MAM).

O desempenho do modelo em simular os padrões observados de precipitação é avaliado pelo cálculo do viés absoluto (precipitação simulada – observada). No presente trabalho, valores de viés entre -2 e +2 indicam boa concordância do modelo com os dados reais, enquanto que valores positivos e negativos maiores do que ±2 indicam superestimativa e subestimativa do modelo, respectivamente.

As projeções futuras são expressas como mudanças, ou seja, variação percentual entre os padrões de precipitação do clima futuro (2015/2039) e a precipitação do clima atual (1989/2013). Uma vez que os valores quantitativos do viés foram calculados para o clima atual, optou-se por apresentar as projeções futuras levando-se em conta a correção da precipitação do modelo pelo valor e sinal do viés. Por exemplo, para o clima atual de uma dada localidade, a chuva média observada é 10 mm e o valor médio do modelo é 8

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

mm, resultando num viés de -2 mm. Assumindo que o viés vai persistir linearmente nas próximas décadas, para um valor simulado de 5 mm no clima futuro, quando aplica-se a correção pelo viés resulta num valor corrigido de 7 mm. Assim sendo, a mudança percentual da precipitação corrigida para o clima futuro é de -30% em relação aos dados observados do clima atual.

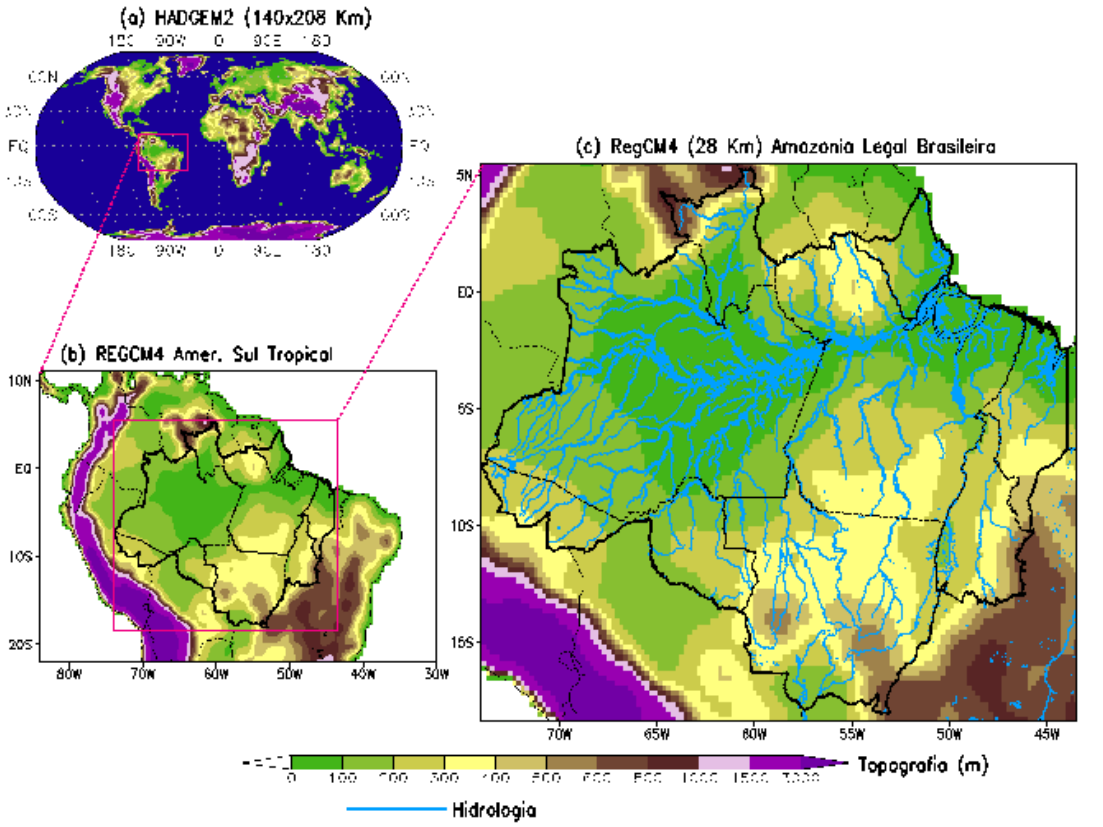

Figura 2. Domínios dos modelos: (a) global HadGEM2 (resolução 140 x 208 Km) e (b) regional RegCM4 (resolução 28 x 28 Km) sobre a América do Sul tropical com o destaque para (c) a região da Amazônia Legal Brasileira. As cores representam a topografia (m) e as isolinhas azuis mostram a hidrologia (rios principais).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os padrões espaciais da precipitação climatológica sazonal em JJA, SON, DJF e MAM para o clima atual (média de 25 anos, 1989/2013) correspondentes aos dados observacionais do CPC (Figura 3, painel superior) e simulações do modelo RegCM4 (Figura 3, painel inferior), cuja análise é descrita a seguir.

Evidencia-se claramente que os trimestres de JJA e SON compreendem os períodos sazonais com regime climático mais seco (ou menos chuvoso) sobre a maior parte da Amazônia. Em JJA, ambos dados observados e simulados

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

indicam a presença de uma área extensa de precipitação abaixo de 1 mm/dia cobrindo a porção centro-sul da Amazônia que engloba Rondônia, Mato Grosso, Tocantins, sudeste do Pará e centro-sul do Maranhão. No outro extremo da região, verificam-se máximos de precipitação entre 7 e 8 mm/dia atingindo Roraima e noroeste do Amazonas. No trimestre seguinte, SON, a precipitação CPC mostra um aumento na porção ocidental da região, entre o Amazonas, Acre, Rondônia, norte do Mato Grosso e sudoeste do Pará, com valores entre 5 e 8 mm/dia. O modelo RegCM4 também mostra esse aumento pluviométrico, entretanto, a precipitação é superestimada principalmente no Acre a na faixa oeste do Amazonas com valores entre 9 e 12 mm/dia. Os mínimos em SON são registrados na porção oriental, entre o Amapá, Maranhão e nordeste do Pará, com valores abaixo de 3 mm/dia, sendo que o modelo consegue reproduzir bem a intensidade e a configuração espacial da precipitação.

Por outro lado, os trimestres de DJF e MAM caracterizam o regime climático mais úmido e chuvoso sobre a Amazônia com volume pluviométrico atingindo máximos de até 14 mm/dia. Em DJF observa-se o máximo pluviométrico, entre 9 e 12 mm/dia, ocupando uma grande área com orientação noroeste/sudeste (NW/SE) sobre o Amazonas, Acre, Rondônia, Mato Grosso, sudoeste do Pará até o centro-sul do Tocantins. O RegCM4 simula a orientação NW/SE deste máximo, contudo o posicionamento é levemente deslocado para a porção sul da região. Nota-se outro máximo com precipitação entre 9 e 12 mm/dia sobre o Amapá e nordeste do Pará, o qual o modelo reproduz apenas na faixa litorânea destes estados. Inversamente, as áreas contendo mínimos de precipitação, valores menores do que 5 mm/dia, se processam ao norte da região, sendo que o RegCM4 consegue reproduzir bem a área de mínimo em Roraima, mas subestima muito no noroeste do Pará. Em MAM, verifica-se que a área contendo máximos de precipitação, 8 e 14 mm/dia, apresenta uma orientação zonal abrangendo a maior parte dos estados do Amapá, Pará, Amazonas e norte do Maranhão. O modelo não consegue simular bem esse máximo e nota-se uma separação da grande área zonal com dois máximos posicionando-se na área ocidental (Amazonas) e oriental (Pará e Maranhão). O modelo não simula o máximo pluviométrico no Amapá e subestima muito a precipitação no norte do Pará.

Concernente aos aspectos observacionais da precipitação, os resultados supracitados, obtidos com os dados do CPC, são consistentes com as análises de dados reportados em estudos climatológicos anteriores. Para o período seco ou menos chuvoso, De Souza e Ambrizzi (2004) evidenciaram a diminuição significativa no volume de precipitação durante o inverno (JJA), associado ao deslocamento aparente do sol para o Hemisfério Norte, quando passa a predominar o ramo descendente da circulação de Hadley sobre os trópicos do Brasil, inibindo assim a formação de nebulosidade convectiva e privando a Amazônia da ocorrência de chuva devido a sistemas de grande escala (FISCH et al., 1998). Já no trimestre da primavera (SON), o aumento na intensidade de precipitação no setor ocidental da região relaciona-se com a convergência de

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

umidade dos ventos alísios a leste dos Andes, bem como pela influência de incursões meridionais pronunciadas de sistema frontais na porção sul da Amazônia (MOLION, 1987; VILAR et al., 2009). Por outro lado, os resultados dos padrões de precipitação observados nos trimestres do período chuvoso são condizentes com trabalhos observacionais prévios que demonstraram a ocorrência do máximo do ciclo anual durante o verão e outono, DJF e MAM (FIGUEROA e NOBRE, 1990; MARENGO et al., 2001; DE SOUZA e AMBRIZZI, 2004). O principal sistema que explica os máximos de precipitação sobre a Amazônia durante DJF é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), caracterizada pela extensa banda de convecção tropical alinhada no sentido NW/SE que se estende desde a Amazônia, centro-oeste e sudeste Brasileiro até o Oceano Atlântico subtropical (FIGUEROA et al., 1995; CARVALHO et al., 2004). Outro sistema relevante é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que atinge sua posição climatológica mais austral em março (NOBRE e SHUKLA, 1996), sendo considerado o principal sistema indutor de precipitação no leste da Amazônia e Nordeste Brasileiro durante MAM (DE SOUZA et al., 2004; DE SOUZA e ROCHA, 2006). A proximidade da ZCIT, bem como o mecanismo de circulação de brisa formam as condições dinâmicas de grande e meso escalas que propiciam a formação das Linhas de Instabilidade (LI) ao longo da região norte/nordeste da Amazônia e que explicam os máximos de precipitação nos períodos de DJF e MAM (COHEN et al., 1995).

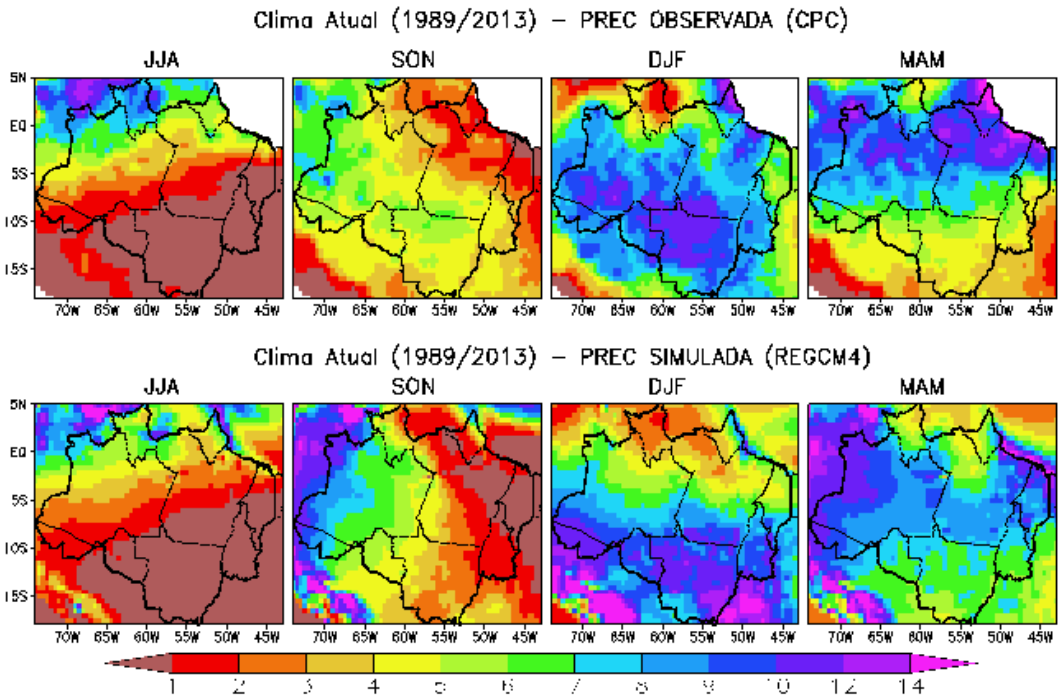

Figura 3. Precipitação em JJA, SON, DJF e MAM para o clima atual (média de 25 anos, 1989/2013) considerando os dados observados do CPC (painel superior) e simulados pelo modelo regional RegCM4 (painel inferior). A escala de cores indica a intensidade da precipitação em mm/dia.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

O desempenho do modelo RegCM4 em reproduzir os padrões regionais de precipitação do clima atual é avaliado objetivamente pelo viés (simulado RegCM4 – observado CPC) mostrado na Figura 4. No trimestre JJA, exceto no norte (Roraima) e nordeste (litoral do Pará), o modelo apresenta boa concordância com os dados do CPC sobre a maior parte dos estados. Em SON, verifica-se superestimativa (viés positivo ou úmido) na precipitação gerada pelo modelo no extremo oeste do Amazonas e Acre e subestimativa (viés negativo ou seco) pluviométrica no Tocantins e nordeste do Mato Grosso. Em DJF, destaca-se o viés seco significativo no Amapá, norte/nordeste do Pará e centro-leste do Amazonas, enquanto que no Acre o modelo apresenta viés úmido. Em MAM, persiste a subestimativa alta de precipitação no Amapá e norte/nordeste do Pará, enquanto que no Acre, sudeste do Mato Grosso e do Pará observam-se áreas com superestimativa de precipitação.

Estudos de *dowscaling* dinâmico do clima atual realizados em trabalhos anteriores também apresentaram erros sistemáticos de superestimativa e subestimativa da precipitação sobre a Amazônia. Da Rocha et al. (2012) realizaram modificações nos esquemas numéricos de convecção (Grell) e em alguns parâmetros de superfície do RegCM3 e melhoraram as simulações de precipitação sobre a Amazônia tanto da intensidade como da fase do ciclo anual, contudo verifica-se viés seco na precipitação do centro-sul da Amazônia durante os meses da estação chuvosa, concordante com as simulações produzidas com o RegCM3 por De Souza et al., (2009) e com o RegCM4 por Reboita et al. (2014). As simulações do clima presente (1961/1990) com o modelo regional ETA-CPTEC mostraram subestimativas no ciclo anual da precipitação da Amazônia, especialmente nos meses da estação chuvosa (CHOU et al. 2012).

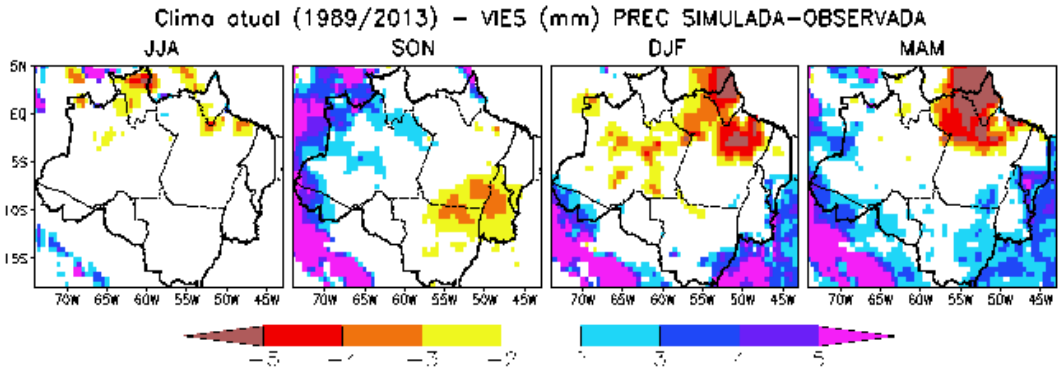

Figura 4. Viés (precipitação simulada - observada) para o clima atual. A escala de cores indica o viés em mm/dia.

Os resultados das projeções de clima futuro (média dos próximos 25 anos, 2015/2039) do RegCM4 são apresentados na Figura 5, sendo que o painel superior mostra a precipitação devidamente corrigida pelo viés e o painel inferior exibe os padrões das mudanças do clima futuro relativo ao clima atual correspondentes aos trimestres JJA, SON, DJF e MAM.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Em geral, verifica-se que os padrões espaciais da precipitação do clima futuro (Figura 5, painel superior) são bem similares aos padrões do clima atual (Figura 3, painel superior) para os quatro trimestres, com diferenças que somente podem ser visualizadas quantitativamente através dos mapas das mudanças (variação percentual do clima futuro relativo ao clima atual) mostrados no painel inferior da Figura 5.

Para os dois trimestres do período seco ou menos chuvoso, o modelo RegCM4 aponta para uma expansão das áreas contendo mínimos pluviométricos climatológicos abaixo de 1 mm/dia na porção sul/sudeste/leste da Amazônia (Figura 5, painel superior), com indicações de mudanças entre -5% e -30% englobando grande parte de Rondônia, Mato Grosso, Tocantins, Maranhão e sul/sudeste do Pará no trimestre de JJA (Figura 5, painel inferior). Esses padrões de diminuição da precipitação tornam-se menores, em área espacial e em intensidade, no trimestre de SON, ficando restritas ao Tocantins, porção central do estado do Amazonas e centro-sul do Pará, com indicação de mudança entre -5% e –10%.

Por outro lado, os padrões de mudanças para os dois trimestres do período chuvoso, assinalam para uma intensificação da precipitação, com percentuais variando entre +5% e +15% sobre os estados do Acre, Amazonas, Pará e Maranhão notadamente no trimestre DJF. Percebe uma retração destas áreas espaciais no trimestre MAM, com indicação de aumento da precipitação de até +10% no setor norte do Amazonas e nordeste do Pará. Inversamente, o modelo indica leve diminuição da precipitação em DJF na porção nordeste do Mato Grosso, sendo que essa área se expande e se intensifica (percentuais entre -5% e -20%) para o sudeste do Pará e grande parte do Mato Grosso e do Tocantins no trimestre MAM (Figura 5, painel inferior).

Portanto, as projeções regionais do RegCM4 indicam que as maiores mudanças nos padrões de precipitação sazonal do clima nos próximos 25 anos (em relação aos padrões do clima atual) é a generalização de diminuição no volume pluviométrico (que pode atingir -30%) notadamente no setor sul/sudeste da Amazônia (Mato Grosso, Tocantins e Pará) no trimestre JJA, bem como a intensificação da precipitação (que pode alcançar +10%) em grande parte da Amazônia (especialmente o Acre, Amazonas Pará e Maranhão) no trimestre DJF. Os trimestres SON e MAM apresentam mudanças relativamente menores espacialmente e em intensidade.

Alguns estudos de modelagem climática reportaram achados que são similares aos obtidos no presente estudo. Marengo et al. (2012) geraram previsões climáticas com modelo regional ETA aninhado ao modelo global HadCM3 (cenário A1B) e reportaram reduções da chuva na porção centro-leste da Amazônia que podem chegar a -40% em medos do século XXI. As simulações regionais de Loppart et al. (2014), usando o RegCM4 aninhado aos resultados de três ensembles de modelos globais com o cenário RCP8.5, indicaram diminuições entre 20 e 40% do volume de chuva da Amazônia para o

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

final do século XXI (2070/2099), principalmente nos meses de julho a outubro (período seco ou menos chuvoso).

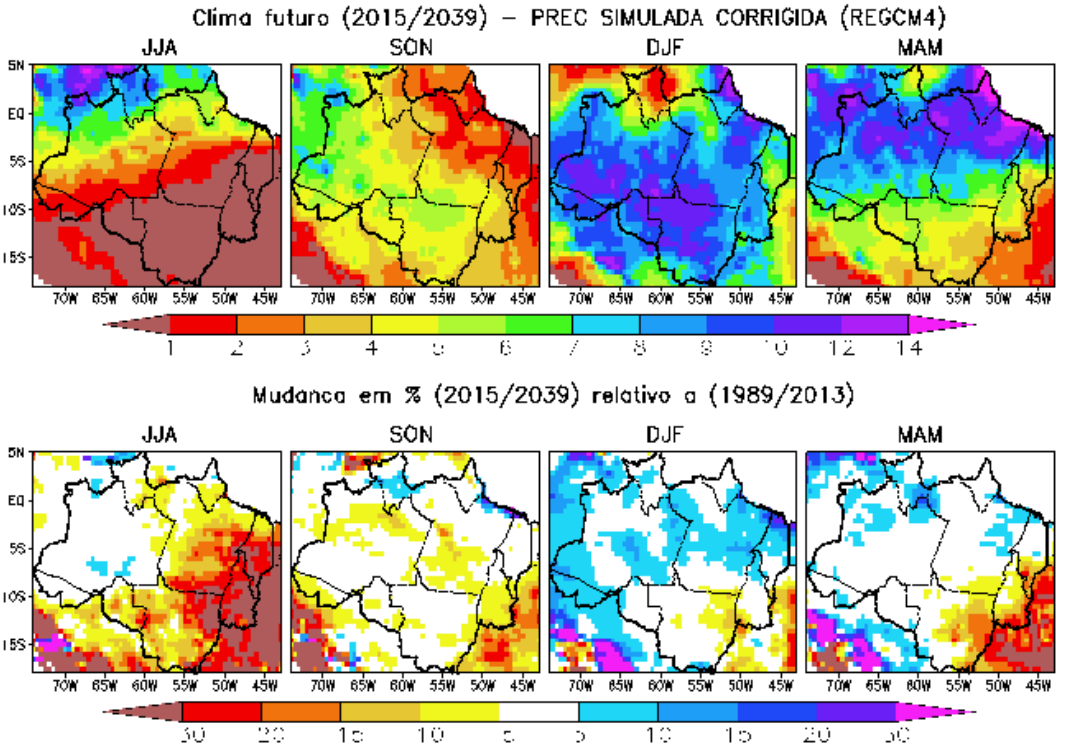

Figura 5. Precipitação em JJA, SON, DJF e MAM para o clima futuro (média dos próximos 25 anos, 2015/2039) com valores corrigidos pelo viés (painel superior) e correspondentes mudanças percentuais do clima futuro relativo ao clima atual (painel inferior). As escalas de cores colocadas na base de cada figura indicam a intensidade da precipitação em mm/dia e da mudança em %.

4. CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou uma contribuição científica aos estudos de modelagem climática regional, particularmente, para a Amazônia. A realização de um *downscaling* dinâmico com o modelo regional RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2 no cenário RCP4.5 do IPCC-AR5 permitiu alcançar as seguintes conclusões principais:

As simulações para o clima atual (últimos 25 anos, 1989/2013) indicaram que o modelo regional é capaz de simular as principais características da variabilidade espacial da precipitação climatológica sazonal nos quatro trimestres ao longo do ano, contudo apresenta erros sistemáticos ao longo da região, especialmente a superestimativa de precipitação na porção nordeste da Amazônia (Amapá e norte/nordeste do Pará) no período chuvoso. Estes resultados também foram reportados em artigos anteriores, indicando e necessidade de modificações e adequações dos esquemas numéricos de

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

convecção profunda e processos de superfície para melhorar a simulação de precipitação no nordeste amazônico.

Concernente às projeções de clima futuro (próximos 25 anos, 2015/2039), as mudanças mais expressivas são esperadas no setor sudeste/leste da Amazônia com indicações de reduções de até 30% no volume de chuva no trimestre JJA numa grande área que abrange o nordeste do Mato Grosso, norte do Tocantins, sudeste do Pará e leste do Maranhão. Tais condições de clima mais seco podem potencialmente exacerbar as condições de estiagens extremas e aumento de das queimadas devido a predominância de clima mais seco e quente.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo convênio ITV x UFPA – Modelagem Climática Regional, pelo CNPq Edital Universal (processo 484779/2012-5) e pela SUDAM através do projeto Aprimoramento da modelagem climática regional da Amazônia (processo Nº CUP 59004/000573/2010-6).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBRIZZI, T., DA ROCHA, R. P.; MARENGO, J. A.; et al. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais**. Relatório** 3, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Brasília, 2007. 108 p.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004.

CHEN, M.; SHI, W.; XIE, P.; co-authors. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. D04110, 2008.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES. P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38 (3), p. 635-653, 2012.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, P. L..; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 3163-3174, 1995.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; co-authors. Development and evaluation of an Earthsystem model-HadGEM2. **Geosci Model Dev Discuss**, v 4(2), p. 997–1062, 2011.

CUADRA S.V., R.P. ROCHA. Simulação numérica do clima de verão sobre o Brasil e sua variabilidade**. Rev. Brasil. Meteorol**., 21(2): 271-282, 2006.

DA ROCHA, R. P., C. A. MORALES, S. V. CUADRA, and T. AMBRIZZI (2009), Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: An evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations, **Journal of Geophysical Research**., v. 114, p. D10108, 2009.

DA ROCHA, R. P.; MORALES, C.A.; CUADRA, S.V.; co-authors. Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: An evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. D10108, 2009.

DA ROCHA, RP ; CUADRA, SV ; REBOITA, MS ; KRUGER, LF ; AMBRIZZI, T ; KRUSCHE, N. Effects of RegCM3 parameterizations on simulated rainy season over South America. **Climate Research**, v. 52, p. 253-265, 2012.

DE SOUZA, E. B., T. AMBRIZZI. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Climanálise**, v. 2, n. 1, p. 1-20, 2004.

DE SOUZA, E. B.; LOPES, M. N. G.; ROCHA, E. J. P.; co-authors. Precipitação climatológica sobre a Amazônia oriental durante o período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24(2), p. 111-124, 2009.

DE SOUZA, E. B.; ROCHA, E. J.P. Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21(3a), p. 142-152, 2006.

DE SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113–122, 2004.

DICKINSON, R.E. A regional climate model for the western United States. **Climate Change**, v. 15, p. 383-422, 1989.

DUARTE, A. F. Aspectos da climatologia do Acre, Brasil, com base no intervalo 1971 – 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, 308-317, 2006.

Emanuel, K.A.; Zivkovic-Rothman, M. 1999. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. **Journal of the Atmospheric Sciences** 56: 1766-1782.

FERNANDEZ, J. P. R., S. H. FRANCHITO, V. B. RAO, Simulation of the summer circulation over South America by two regional climate models. Part I: Mean climatology., **Theor. Appl. Climatol**., 86, 247–260, 2006.

FIGUEROA, S. N., NOBRE, C. A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, v.5, p.36-45. 1990.

FIGUEROA, S. N.; SATYAMURTY, P.; SILVA DIAS, P.L. Simulation of the summer circulation over the South American region with an ETA coordinate model**. Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p. 1573–1584, 1995.

FISCH, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v.28, n.2, p.101-126. 1998.

GIORGI, F.; BATES, G. T. The climatological skill of a regional climate model over complex terrain. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 2325-2347, 1989.

GIORGI, F.; MARINUCCI, M. R.; BATES, G. T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: boundary-layer and radiative transfer processes. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 2794-2813, 1993a.

GIORGI, F.; MARINUCCI, M. R.; BATES, G. T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 2814-2832, 1993b.

GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Introduction to special section: regional climate modeling revisited. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 6335-6352, 1999.

GIORGI, F; COPOLA, E.; SOLMON, F; co-authors. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**, v. 52, p. 7-29, 2012.

GRELL, G. A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 764-787, 1993.

LLOPART, M.; COPPOLA, E.; GIORGI, F.; ROCHA, R. P.; CUADRA, S. V. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. **Climatic Change**, v. 125, p. 111–125, 2014.

LOPES, M. N. G.; DE SOUZA, E. B.; FERREIRA, D. B. S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 9, v. 12, p. 84-102.

MACHADO, R.D. ; DA ROCHA, R. P. . Previsões climáticas Sazonais sobre o Brasil: avaliação do RegCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 121-126, 2011.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. S.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38(9-10), p. 1829-1848, 2012

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V. E.; FILIZOLA, N. P.; WAINER, I. C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 833-852, 2001.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da Região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 107-117, 1987.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of SST, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2464-2479, 1996.

PAL, J. S.; GIORGI, F.; BI, X.; et al. The ICTP RegCM3 and RegCNET: regional climate modeling for the developing World. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 1, p. 1395-1409, 2007.

PBMC - **Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo – Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, Rio de Janeiro, v. 1, 2013. 24 p.

REBOITA, M. S. da Rocha, R. P.; AMBRIZZI, T.; SUGAHARA, S. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1331-1347, 2010.

SETH, A., S.A. RAUSCHER, S.J. CAMARGO, J-H QIAN, J.S. PAL. RegCM3 regional climatologies for South America using reanalysis and ECHAM global model driving fields. **Climate Dynamics**, v. 28, p. 461–480, 2007.

SILVA, V. B. S., KOUSKY, V. E., SHI, W., HIGGINS, R. W. An improved gridded historical daily precipitation analysis for Brazil. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, p. 847-861, 2007.

VAN VUUREN, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, p. 5-31, 2001.

VILLAR, E. J. C.; RONCHAIL, J., GUYOT, J. L.; co-authors. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 1574–1594, 2009.

Texto submetido à RBClima em 28/10/2015