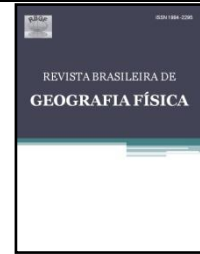




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Avaliação dos Impactos da Mudança do Clima na Precipitação da Amazônia Utilizando o Modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES

Vinícius Machado Rocha¹, Francis Wagner Silva Correia², Wesley de Brito Gomes³

¹Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Santo Amaro, BA, Brasil. E-mail: vinimrocha@ufrb.edu.br (autor correspondente).

²Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, AM, Brasil.

³Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, AM, Brasil.

Artigo recebido em 26/07/2019 e aceito em 24/11/2019

RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos da mudança do clima durante o século XXI sobre a precipitação na Amazônia, utilizando o modelo regional Eta forçado com o cenário de emissões RCP 8.5 proveniente do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES. As mudanças projetadas para o clima futuro mostram que, os impactos nos componentes do balanço de umidade foram mais significativos durante a estação chuvosa e no setor sul da bacia, principalmente, no final do século. O mecanismo de retroalimentação positivo é configurado durante o verão e na média anual, isto é, a redução da convergência de umidade e da evapotranspiração à superfície agiram no mesmo sentido para reduzir a precipitação total; no entanto, o mecanismo de retroalimentação negativo é dominante no inverno, em que a redução da evapotranspiração é parcialmente compensada pelo aumento da convergência de umidade, porém, não o suficiente para inibir a redução da precipitação. A redução da precipitação total na Amazônia foi decorrente tanto da redução da precipitação de origem local quanto advectiva, sendo que a advectiva teve papel predominante devido às mudanças na circulação regional e no transporte de umidade para a bacia. Esses resultados mostram que, a mudança do clima pode afetar de forma significativa os componentes do balanço de água na Amazônica, implicando em graves consequências ecológicas ao bioma, tais como: afetando a dinâmica dos ecossistemas, reduzindo a capacidade da floresta em absorver carbono, favorecendo a ocorrência de eventos extremos, aumentando a temperatura à superfície e, conseqüentemente, a frequência e intensidade das queimadas.

Palavras-chave: Amazônia, precipitação, balanço de água, modelo regional Eta, cenário de emissões RCP 8.5.

Assessment of the Effects of Climate Change on Precipitation in the Amazon Basin Using the RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES Model

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the effects of climate change on precipitation in the Amazon basin during the 21st century using the Eta Regional Climate Model forced by RCP 8.5 emissions scenario from the HadGEM2-ES earth system model. The changes projected for future climate show that the impacts on the water budget components were more significant during the rainy season and southern basin sector, especially at the end of the 21st century. The positive feedback mechanism is configured during the summer and on average annually, i.e., the reduction of moisture convergence and surface evapotranspiration acted in the same way to reduce total precipitation. The negative feedback mechanism is seen during the winter, where the reduction of evapotranspiration is partially offset by the increase in moisture convergence, however, not sufficient to offset the reduction in precipitation. The reduction in total precipitation in the Amazon was due to both the decrease of local and advective precipitation, but the advective had a major role due to changes in the regional circulation and moisture transport over the basin. These results show that climate change can significantly affect the components of the water budget in the Amazon basin, resulting in serious ecological consequences for the biome, such as affecting ecosystem dynamics, reduction in the forest's ability to absorb carbon, causing the occurrence of extreme events, increasing the surface temperature, and hence, the frequency and intensity of fires.

Keywords: Amazon basin, precipitation, water budget, Eta regional model, RCP 8.5 emissions scenario.

Introdução

A Amazônia é a única grande extensão contínua de floresta tropical úmida do mundo com uma área de aproximadamente 6,5 milhões de km², que corresponde a 56% das florestas tropicais da Terra, desempenhando um importante papel nas trocas de energia, umidade e massa entre a superfície continental e a atmosfera, fornecendo serviços ambientais fundamentais para a manutenção do clima regional e global, tais como: o armazenamento e absorção do excesso de carbono da atmosfera, o transporte de gases traço, aerossóis e vapor d'água para regiões remotas e, sobretudo, a reciclagem de precipitação, de grande importância para o funcionamento de seus ecossistemas. A floresta amazônica também atua como fonte indispensável de calor para a atmosfera global através de sua intensa evapotranspiração e liberação de calor latente na média e alta troposfera tropical, contribuindo para a geração e manutenção da circulação atmosférica em escalas regional e global (Artaxo et al., 2005; Fearnside, 2005; Marengo, 2006; Malhi et al., 2008; Nobre et al., 2009a,b; Satyamurty et al., 2013).

Com relação ao balanço de água, a bacia amazônica se comporta como um sumidouro de umidade da atmosfera, recebendo vapor d'água tanto do transporte de origem oceânica quanto da evapotranspiração produzida pela própria floresta tropical. Considerando a circulação regional, a Amazônia representa uma importante fonte de umidade para o Centro, Sudeste e Sul do Brasil, assim como para o norte da Argentina, incluindo a bacia do Prata, contribuindo para o regime da precipitação nessas regiões (Marengo, 2004, 2005, 2006; Marengo et al., 2004; Vera et al., 2006; Correia et al., 2007; Satyamurty et al., 2013). Entretanto, os efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas na precipitação e, consequentemente, no ciclo hidrológico regional ainda não são completamente entendidos.

A Amazônia é sensível às variabilidades e mudanças no sistema climático, devido tanto às variações naturais (não lineares) inerentes ao próprio sistema quanto às antropogênicas, tais como: o aumento na concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e as mudanças de uso e cobertura da terra como, por exemplo, desflorestamento, atividades agrícolas e urbanização (Correia et al., 2008; Rocha et al., 2012; Marengo et al., 2012; Espinoza et al., 2014; Marengo e Espinoza, 2015). Essas mudanças podem afetar o funcionamento dos ecossistemas amazônicos, reduzindo sua capacidade de capturar o carbono da atmosfera, influenciando os padrões espaciais de umidade do solo, alterando o ciclo

hidrológico regional e, consequentemente, a precipitação.

Marengo et al. (2012) avaliaram os impactos da mudança climática sobre a América do Sul ao longo do século XXI utilizando o Modelo Climático Regional (MCR) Eta, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e cenário de emissões A1B (*Special Report on Emission Scenarios – SRES*) provenientes do Modelo de Circulação Geral (MCG) HadCM3. Os autores observaram redução da precipitação nas regiões tropicais do continente, incluindo a Amazônia e o Nordeste do Brasil, e aumento sobre o Sudeste da América do Sul (SEAS). Chou et al. (2014) realizaram simulações com alta resolução utilizando o MCR Eta forçado com os cenários de emissões RCP 8.5 e RCP 4.5 (*Representative Concentration Pathway – RCP*) provenientes dos modelos do sistema terrestre HadGEM2-ES e MIROC5 a fim de avaliar os efeitos da mudança do clima durante o século XXI. Segundo os autores, a redução da precipitação na parte central e o aumento sobre o SEAS são mudanças comuns projetadas por ambos os modelos globais.

Apesar das mudanças projetadas no ciclo hidrológico da bacia amazônica, ainda não se conhece quais as implicações que as mudanças climáticas podem conduzir na precipitação na Amazônia, sobretudo, no que diz respeito à precipitação de origem local e à precipitação advectada para a região, e quais mecanismos físicos contribuirão para alterá-la. Diante disso, o objetivo deste estudo é avaliar os efeitos da mudança do clima ao longo do século XXI sobre a precipitação na Amazônia, abordando os mecanismos físicos envolvidos no processo. Para tanto, foram utilizadas as simulações do MCR Eta forçado com o cenário de emissões RCP 8.5 produzido a partir do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES (CHOU et al., 2014).

Material e métodos

Cenários de Emissões

Neste estudo utilizou-se o cenário de emissões RCP 8.5, produzido a partir das simulações do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES. No Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), os cenários são baseados no forçamento radiativo antropogênico total ao final do século XXI. Os modelos de desenvolvimento socioeconômicos podem assumir diferentes trajetórias que convergirão em quatro forçantes radiativas distintas, equivalentes às concentrações dos GEE denominados *Representative Concentration Pathway* (RCP)

cenários. Os quatro diferentes cenários são denominados como: RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 e RCP 2.6, que correspondem às forçantes radiativas de 8.5 Wm^{-2} , 6.0 Wm^{-2} , 4.5 Wm^{-2} e 2.6 Wm^{-2} , respectivamente. O primeiro (último) RCP é o mais pessimista (otimista) e resulta em um aquecimento médio global de, aproximadamente, 4°C (1°C) ao final do século XXI.

Os Modelos

Neste estudo foram utilizados os cenários de clima futuro (RCP 8.5) produzidos pelo modelo global acoplado do sistema terrestre HadGEM2-ES, do Met Office Hadley Centre (MOHC), e regionalizado para a América do Sul com o MCR Eta (CPTEC/INPE).

O modelo do sistema terrestre utilizado para *downscaling* é o HadGEM2-ES (Collins et al., 2011; Martin et al., 2011). O HadGEM2-ES é um modelo em ponto de grade de resolução N96, que equivale à $1,875$ graus de longitude e $1,275$ graus de latitude, e 38 níveis na atmosfera. No oceano, o modelo possui 40 níveis na vertical; e na horizontal, a resolução varia de $1/3$ graus nos trópicos a 1 grau nas latitudes superiores a 30° . O HadGEM2-ES é um modelo do sistema terrestre cujo ciclo do carbono é representado. Sobre a superfície da terra, o ciclo do carbono é modelado pelo esquema de vegetação dinâmica TRIFFID (*Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics*) (Cox, 2001), que distingue cinco tipos funcionais de plantas: árvores de folhas grandes e coníferas, gramíneas C3 e C4, e vegetação arbustiva. O HadGEM2-ES ainda inclui a química da atmosfera e um modelo de aerossol com a representação do carbono orgânico e da pluma de poeira.

O modelo regional Eta é utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE desde 1997 para a previsão do tempo (Chou, 1996), desde 2002 para previsões climáticas sazonais (Chou et al., 2005), e desde 2010 para simulações de mudanças climáticas (Pesquero et al., 2010; Marengo et al., 2012). Esta versão tem sido validada e aplicada para estudos de impacto e vulnerabilidade (Resende et al., 2011; Rodrigues et al., 2011; Matos et al., 2012; Chou et al., 2014). O MCR Eta utiliza a coordenada vertical Eta (Mesinger, 1984), que permanece aproximadamente horizontal em áreas montanhosas, o que torna a coordenada adequada para estudos em regiões de topografia acidentada como a Cordilheira dos Andes na América do Sul. A dinâmica do modelo é determinada em volumes finitos (Janjić, 1984; Mesinger et al., 2012). As convecções profunda e rasa são parametrizadas de acordo com o esquema de Betts-Miller (Betts e Miller, 1986), modificado por Janjić (1994). A

microfísica de nuvens segue o esquema de Zhao et al. (1997). Os processos de superfície da terra são representados pelo esquema NOAH (Ek et al., 2003). O MCR Eta distingue 12 tipos de vegetação e 9 tipos de solo. Os fluxos radiativos são tratados pelo esquema de Lacis e Hansen (1974) para ondas curtas e pelo esquema proposto por Fels e Schwarzkopf (1975) para ondas longas.

Estratégia de Integração Numérica

Neste estudo foram utilizados os cenários de clima presente e futuro regionalizados pelo MCR Eta forçado 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 (CO_2) foi mantida constante, a 330 ppm. Para o clima futuro, as integrações numéricas foram executadas em três períodos: 2006-2040, 2040-2070 e 2070-2100, utilizando o cenário de emissões RCP 8.5. A temperatura da superfície do mar (TSM) é fornecida pelo modelo global HadGEM2-ES e atualizada diariamente. Tanto a umidade inicial do solo quanto a temperatura inicial do solo são derivadas do modelo do sistema terrestre. As condições de contorno lateral foram atualizadas a cada 6 horas. O modelo foi configurado com uma resolução de 20 km e 38 níveis verticais, cujo topo definiu-se em 25 hPa. O domínio do modelo abrange a maior parte da América do Sul (Figura 1).

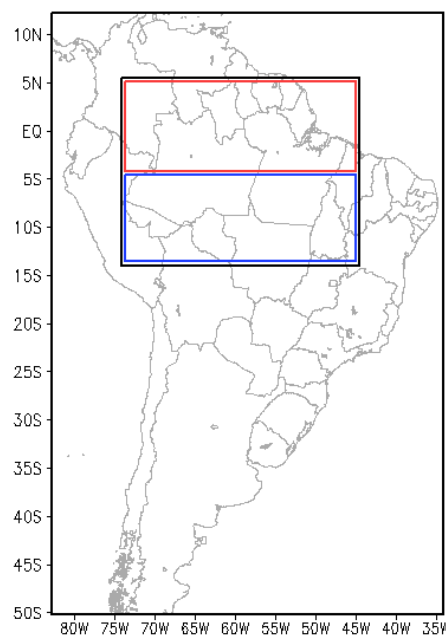


Figura 1. Domínio do modelo. Bacia amazônica, limite em preto; Amazônia setentrional, limite em vermelho; Amazônia meridional, limite em azul.

Resultados e discussão

Os resultados são apresentados para períodos futuros de 20 anos: 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2099. As mudanças climáticas são avaliadas com base no período histórico de 1985 a 2005, definido como clima presente, considerando os campos médios sazonais contrastantes e o ciclo anual dos componentes do balanço de umidade (precipitação total, precipitação de origem local, precipitação de origem advectiva, evapotranspiração à superfície, transporte de vapor d'água e convergência de umidade integrada verticalmente) na bacia amazônica (Figura 1).

Precipitação e evapotranspiração

As Figuras 2 e 3 apresentam as mudanças nos campos médios da precipitação e evapotranspiração, respectivamente, em relação ao período de 1985 a 2005, projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES para os três períodos futuros (2015-2035, 2045-2065 e 2079-2099) durante o verão (DJF) e inverno (JJA) austral.

Em DJF, uma redução significativa da precipitação é observada sobre uma grande área que se estende desde a região Norte até o Centro-Sul do Brasil, na região de atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), principal sistema meteorológico responsável pelo acúmulo de grandes quantidades de chuva sobre o continente. A mudança no clima sugere uma redução na frequência dos episódios de ZCAS ou uma redução da atividade convectiva na região da ZCAS na geração de precipitação. Esta redução está de acordo com a intensificação da alta pressão subtropical e dos ventos sobre o continente, que podem bloquear a passagem de frentes frias se movendo em direção às latitudes inferiores. Comparando com os resultados encontrados por Marengo et al. (2012), no qual utilizaram o modelo Eta-HadCM3 e o cenário de emissões SRES A1B, a redução da precipitação nesse estudo com o cenário RCP 8.5 foi mais extensa, expandindo-se mais para o sul do Brasil. Embora o sinal de redução da precipitação ocorra nos três períodos futuros, ao final do século a redução é mais intensa. Além disso, a região de máxima redução da precipitação está localizada sobre o Centro e o Sudeste do Brasil, e não na Amazônia ou no Nordeste do Brasil como apresentado em Marengo et al. (2012). O extremo norte da América do Sul e noroeste da Amazônia mostram aumento da precipitação, sobretudo nos períodos de 2015-2035 e 2045-2065, estando associado ao aumento da convergência de umidade e massa em baixos níveis e, também, ao transporte de ar úmido trazido pelos

ventos alísios na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Em JJA, com a migração da ZCIT em direção às latitudes setentrionais, a redução na precipitação ocorre, principalmente, no setor norte do continente. Por outro lado, é projetado para o final do século um aumento da precipitação no SEAS, porém, limitada às áreas próximas ao litoral sul do Brasil. Na bacia amazônica, de maneira geral, a redução da precipitação é mais pronunciada durante a estação chuvosa e, principalmente, ao final do século (37%). Os impactos foram mais significativos sobre a Amazônia meridional, também durante a estação chuvosa, onde a redução da precipitação foi de, aproximadamente, 40% ao final do século. Considerando toda a bacia, na média anual, a redução da precipitação é da ordem de 16%, 11% e 35% no início, meados e final do século XXI, respectivamente.

Em DJF, uma redução significativa da evapotranspiração é observada, sobretudo, no litoral norte da América do Sul, na Amazônia oriental, interior do Nordeste do Brasil, na região Sudeste do país e em grande parte do Brasil Central. Por outro lado, verifica-se um aumento da evapotranspiração sobre o sul do continente, especificamente no setor centro-norte da Argentina. Em JJA, a redução da evapotranspiração é mais pronunciada no Brasil Central, na Amazônia meridional e oriental, e no litoral norte da América do Sul. Todavia, é identificado um aumento da evapotranspiração sobre o noroeste da bacia amazônica, principalmente, ao final do século. A mudança no clima, devido ao cenário de emissões RCP 8.5, indica que a redução da precipitação em grande parte da América do Sul afetou o estoque de água no solo, isto é, a umidade do solo diminuiu e, consequentemente, o fluxo de calor latente (evapotranspiração) reduziu; com isso, a maior parte do particionamento de energia foi para fluxo de calor sensível, aquecendo o ar e aumentando a temperatura sobre o continente. Chou et al. (2014) observaram um aumento da temperatura à superfície na bacia amazônica da ordem de 3,5°C e 8,0°C durante o início e fim do século XXI, respectivamente. Embora o sinal de redução da evapotranspiração em grande parte do continente sul americano ocorra nos três períodos futuros, tanto no verão quanto no inverno austral, os máximos são projetados para o final do século, porém, com maior (menor) intensidade em DJF (JJA).

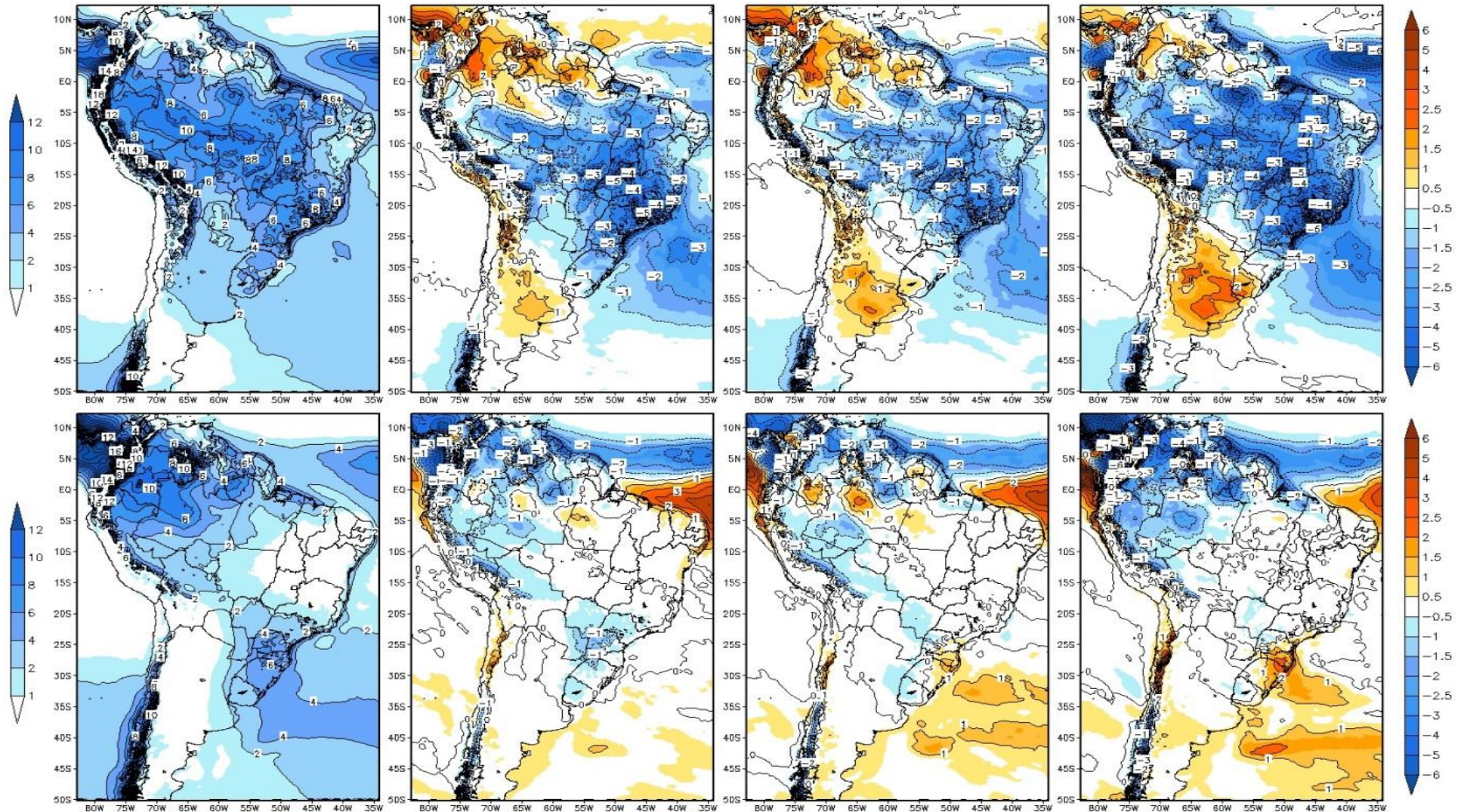


Figura 2. Distribuição média da precipitação (mm dia⁻¹) para o clima presente e a diferença entre os períodos futuros e o clima presente projetada pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (1985-2005, sem o cenário RCP 8.5); 2 – 2015-2035; 3 – 2045-2065; 4 – 2079-2099. A magnitude das mudanças projetadas é destacada nas paletas de cores à direita.

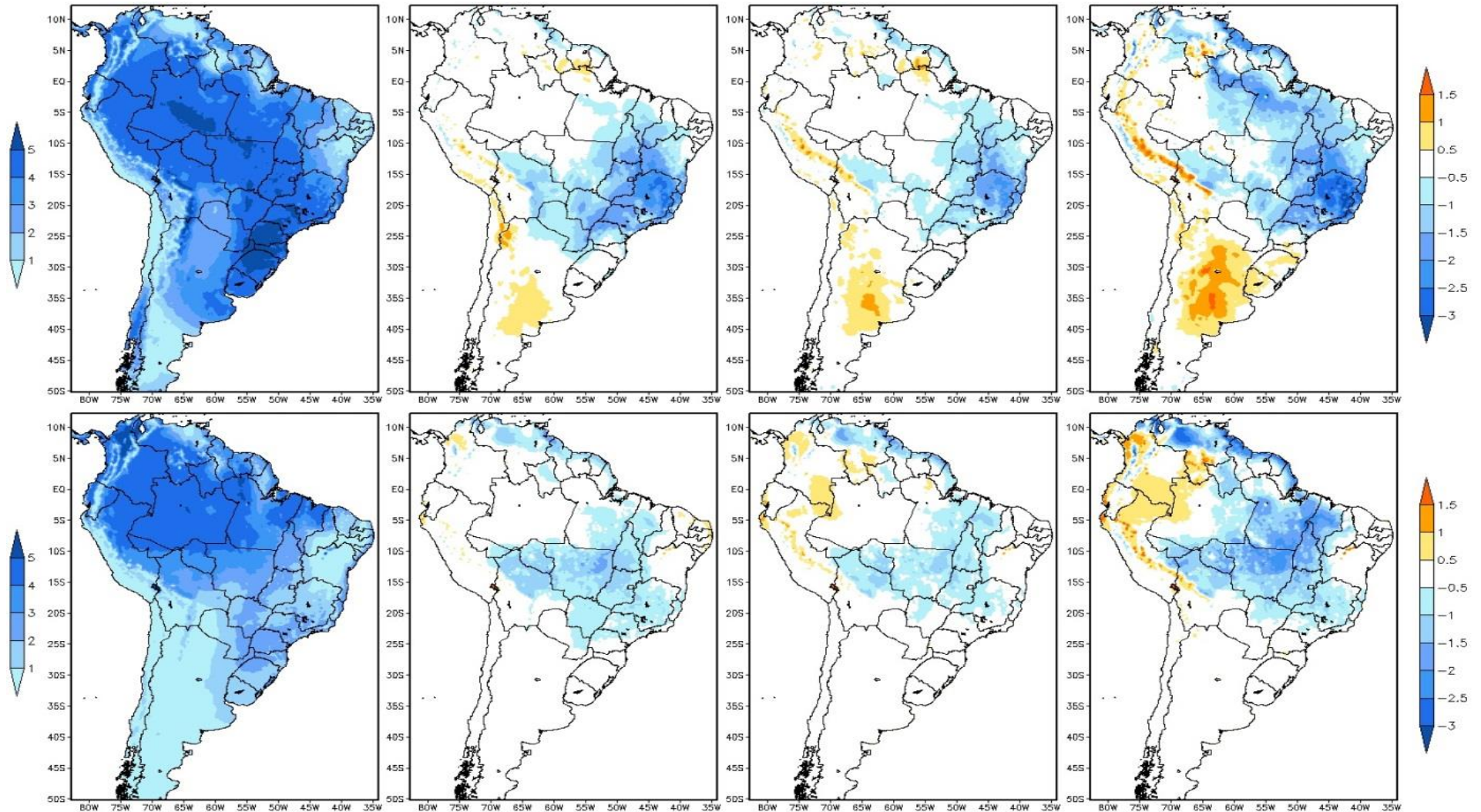


Figura 3. Distribuição média da evapotranspiração (mm dia-1) para o clima presente e a diferença entre os períodos futuros e o clima presente projetada pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (1985-2005, sem o cenário RCP 8.5); 2 – 2015-2035; 3 – 2045-2065; 4 – 2079-2099. A magnitude das mudanças projetadas é destacada nas paletas de cores à direita.

Transporte e convergência de umidade

As Figuras 4 e 5 apresentam as mudanças nos campos médios do fluxo e da convergência do vapor d'água integrado verticalmente, respectivamente, projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES.

De maneira geral, um padrão da circulação equatorial durante o verão austral são os ventos alísios que, associados à intensificação da alta subtropical do Atlântico Norte, transportam umidade para o interior da bacia amazônica e do continente. Segundo Satyamurty et al. (2013) e Drumond et al. (2014), esse fluxo de vapor d'água proveniente do Atlântico equatorial é a principal fonte de umidade para a Amazônia. As projeções do modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES para os três períodos futuros mostram que, o transporte de umidade se intensificou sobre a bacia amazônica e desintensificou na região do jato de baixos níveis (JBN) durante o verão austral, conduzindo menos umidade da Amazônia para o Centro-Sul e Sudeste do Brasil. As mudanças na circulação da atmosfera ocasionaram, ainda, um aumento no transporte de umidade em direção ao setor centro-norte da Argentina (Figura 4). Nessa estação, a redução da convergência de umidade em baixos níveis sobre uma grande área que se estende desde a região Norte ao Centro-Sul do Brasil (Figura 5) conduziu a redução da precipitação nessas regiões. Na bacia amazônica observou-se uma redução significativa da convergência de umidade, apresentando valores entre 3 e 5 mm dia⁻¹. Outrossim, a redução da convergência de umidade também é observada na região da ZCIT, contribuindo para a redução do regime de chuvas no norte e nordeste do continente.

Em JJA, a circulação em baixos níveis projetada para os três períodos futuros mostra uma intensificação do transporte de umidade sobre a bacia amazônica. Além disso, as mudanças na circulação da atmosfera conduziram ao aumento no transporte de umidade para a região Sul do Brasil, principalmente a partir de meados do século XXI (Figura 4). Na Amazônia, a redução da convergência de umidade foi mais intensa nos setores norte e oeste da bacia, exercendo papel preponderante na redução da precipitação sobre essas áreas (Figura 5).

Precipitação de origem local e advectiva

As Figuras 6 e 7 apresentam as mudanças nos campos médios sazonais da precipitação de origem local (gerada a partir da evapotranspiração da região) e advectiva (proveniente do transporte

de umidade para a região), respectivamente, projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES para os três períodos futuros.

Em DJF, uma redução da precipitação de origem local é observada sobre a Amazônia meridional (estendendo-se para a Amazônia central e oriental ao final do século), Pantanal, parte da bacia do Prata e, de forma mais significativa, nas regiões Central, Sul e Sudeste do Brasil, associada à diminuição da evapotranspiração da superfície. Do mesmo modo, durante o verão austral, uma redução da precipitação de origem advectiva é verificada em uma grande área que se estende desde o norte até o centro-sul do Brasil (região predominante da ZCAS), contribuindo para a redução da precipitação total sobre o continente. Tanto a redução da precipitação de origem local quanto advectiva contribuíram para a mudança da precipitação total sobre a bacia amazônica, sendo que, a precipitação de origem advectiva apresentou papel preponderante. Por outro lado, o extremo norte da América do Sul e noroeste da Amazônia mostram aumento da precipitação de origem advectiva, sobretudo entre 2015-2035 e 2045-2065, associada ao aumento da convergência de umidade e massa em baixos níveis. O aumento da precipitação de origem advectiva sobre o sul do continente, especificamente no setor centro-norte da Argentina, deve-se, principalmente, ao aumento no transporte de vapor d'água e da convergência de umidade nessa região, causado pelas mudanças na circulação atmosférica.

Em JJA, a redução da precipitação de origem local e advectiva ocorrem, sobretudo, no setor norte da América do Sul, em especial na Amazônia ocidental. A redução da precipitação de origem local, associada à diminuição da evapotranspiração da floresta tropical, é mais evidente no sudoeste da bacia amazônica e ao final do século, enquanto que a redução da precipitação de origem advectiva é maior sobre o norte e noroeste da região em todos os períodos futuros. Por outro lado, é projetado para o final do século um aumento da precipitação de origem advectiva nas áreas próximas ao litoral sul do Brasil, associada ao aumento no transporte de vapor d'água e da convergência de umidade e massa em baixos níveis. Esses resultados mostram que, as mudanças no clima decorrentes do aumento dos GEE afetam a estrutura termodinâmica da atmosfera, alterando a circulação em escala regional, o transporte de umidade sobre a bacia amazônica e, conseqüentemente, a precipitação de origem advectiva e local.

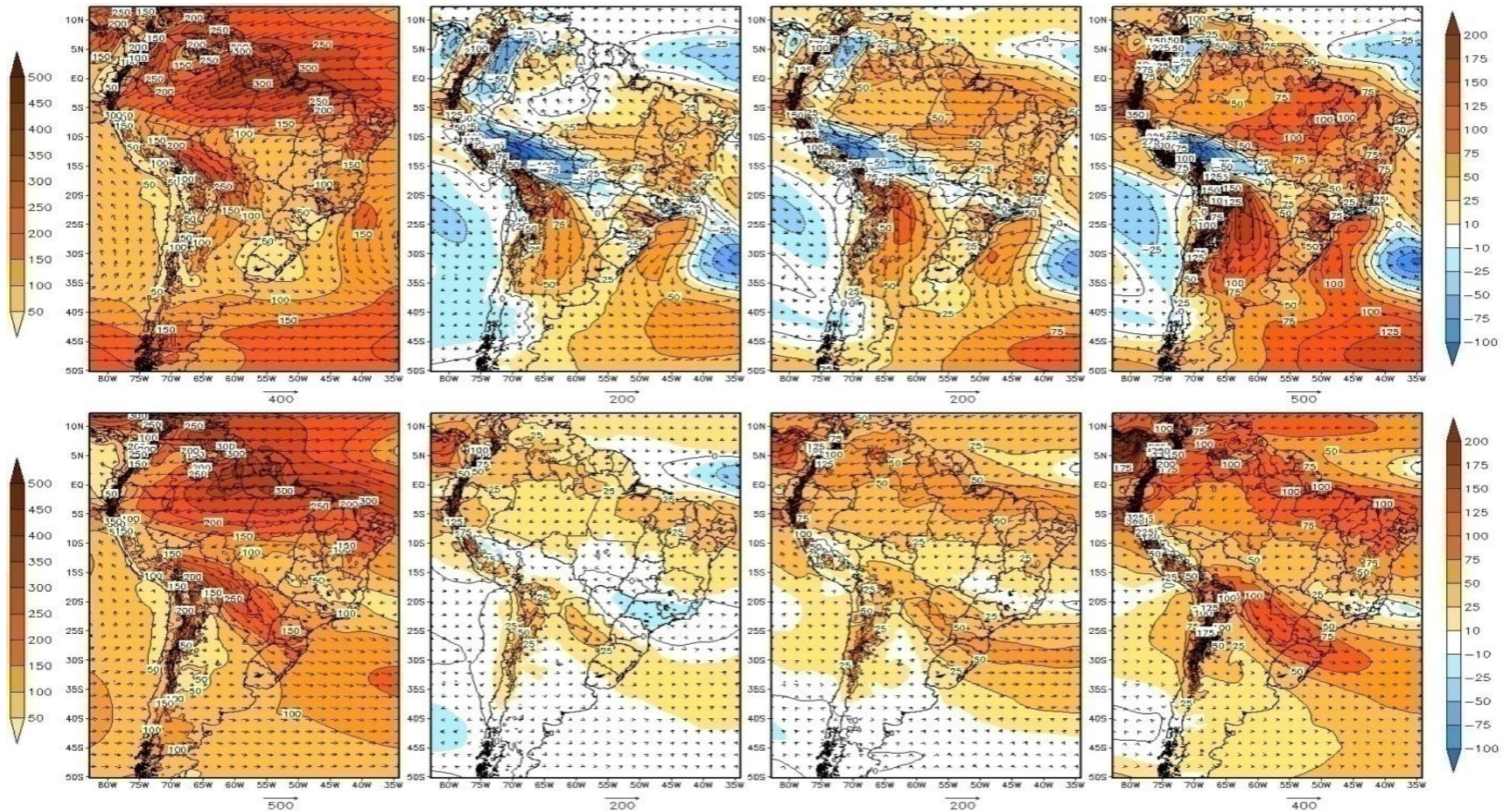


Figura 4. Distribuição média do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) para o clima presente e a diferença entre os períodos futuros e o clima presente projetada pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (1985-2005, sem o cenário RCP 8.5); 2 – 2015-2035; 3 – 2045-2065; 4 – 2079-2099. A magnitude das mudanças projetadas é destacada nas paletas de cores à direita.

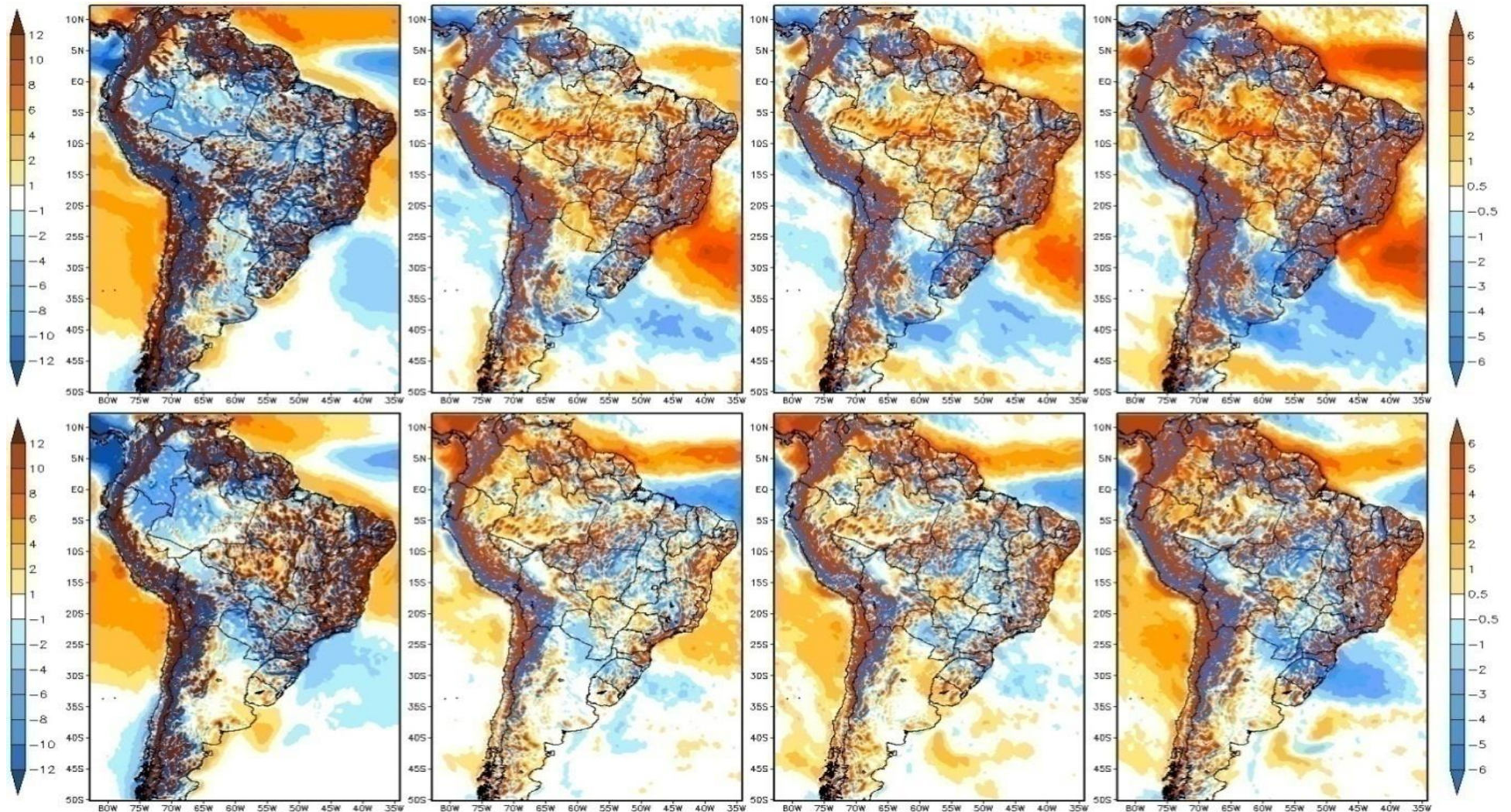


Figura 5. Distribuição média da convergência de umidade (mm dia-1) para o clima presente e a diferença entre os períodos futuros e o clima presente projetada pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (1985-2005, sem o cenário RCP 8.5); 2 – 2015-2035; 3 – 2045-2065; 4 – 2079-2099. A magnitude das mudanças projetadas é destacada nas paletas de cores à direita.

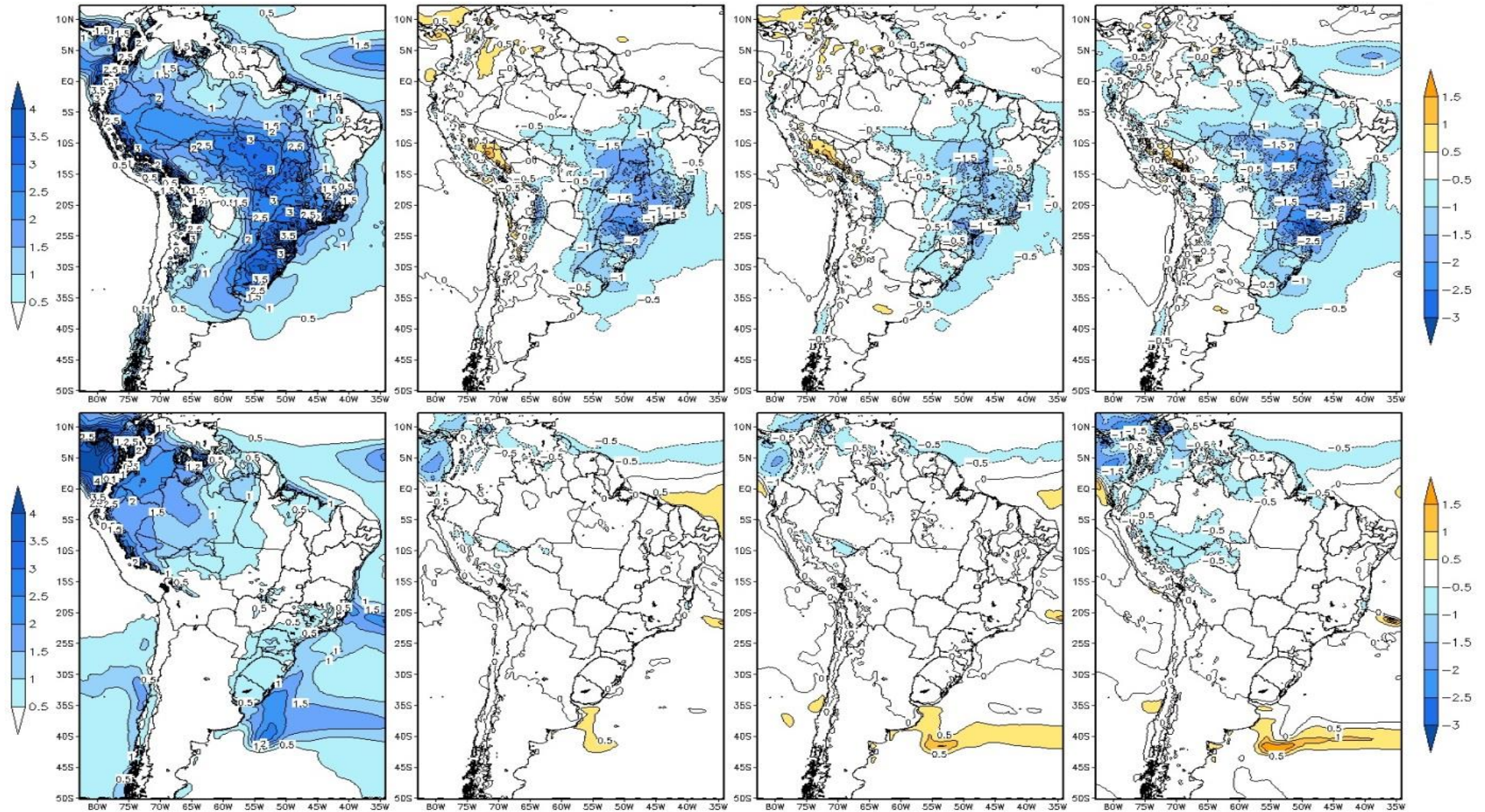


Figura 6. Distribuição média da precipitação de origem local (mm dia⁻¹) para o clima presente e a diferença entre os períodos futuros e o clima presente projetada pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (1985-2005, sem o cenário RCP 8.5); 2 – 2015-2035; 3 – 2045-2065; 4 – 2079-2099. A magnitude das mudanças projetadas é destacada nas paletas de cores à direita.

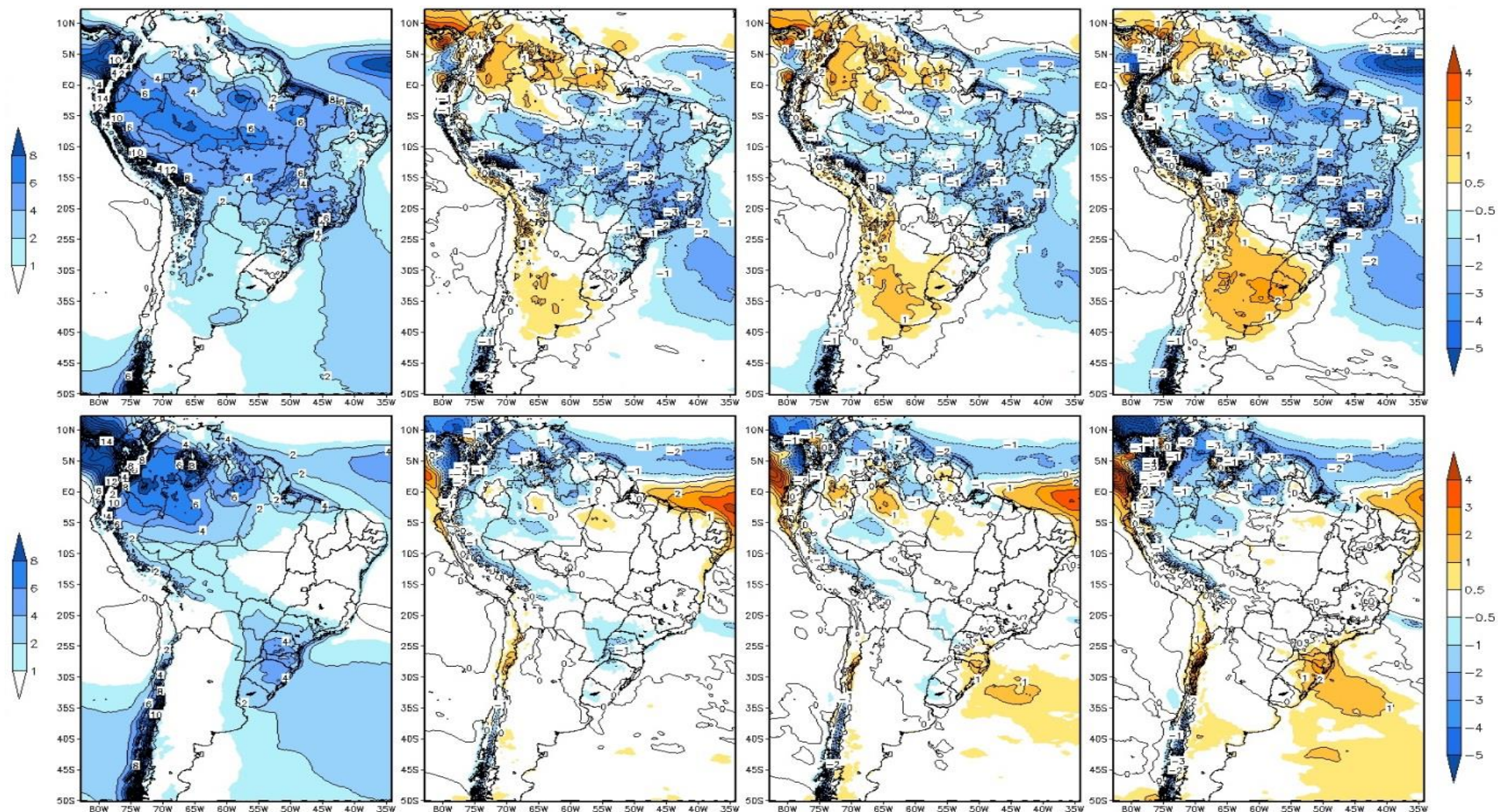


Figura 7. Distribuição média da precipitação de origem advectiva (mm dia-1) para o clima presente e a diferença entre os períodos futuros e o clima presente projetada pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (1985-2005, sem o cenário RCP 8.5); 2 – 2015-2035; 3 – 2045-2065; 4 – 2079-2099. A magnitude das mudanças projetadas é destacada nas paletas de cores à direita.

Ciclo anual

A Figura 8 apresenta as mudanças no ciclo anual dos componentes do balanço de umidade – precipitação total (P), precipitação de origem local (P_l), precipitação de origem advectiva (P_a), evapotranspiração da superfície (E), convergência de umidade (C) e fluxo de vapor d’água integrado verticalmente (F) – projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES para os três períodos futuros (2015-2035, 2045-2065 e 2079-2099), em relação ao clima presente (1985-2005), na bacia amazônica e em seus setores norte e sul.

De maneira geral, observa-se a redução de P , praticamente, em todos os meses nos três períodos futuros, estando associada, principalmente, à redução de C sobre a região, que conduziu menos P_a para a bacia amazônica. A sazonalidade de P , P_a e P_l é mais pronunciada na Amazônia meridional e está associada ao padrão do regime de monção da América do Sul e à oscilação no sentido norte-sul da ZCIT. A redução de P é mais (menos) pronunciada durante a estação chuvosa (seca), sendo a redução de P_a o principal fator para a mudança no regime da precipitação na estação chuvosa e P_l durante a estação seca. Na média anual, a contribuição de P_a é igual (entre 2045-2065) ou maior do que a de P_l para a redução de P . A mudança no clima da Amazônia no cenário de emissões RCP 8.5 sugere a configuração do mecanismo de retroalimentação positivo (MRP)

durante o verão austral e na média anual, isto é, a redução da convergência de umidade (por meio da alteração na estrutura termodinâmica da atmosfera e na circulação regional) e da evapotranspiração à superfície agiram no mesmo sentido para reduzir a precipitação total. Este cenário é preocupante para a Amazônia, uma vez que, o MRP pode causar instabilidade em seus ecossistemas, que não apresentam grande capacidade de adaptação às mudanças climáticas, sobretudo, se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo – décadas (Nobre et al., 2006; Scholze et al., 2006; Salazar et al., 2007). Por outro lado, no inverno austral o mecanismo de retroalimentação negativo (MRN) é caracterizado, isto é, a redução de E é parcialmente compensada pelo aumento de C , porém, não o suficiente para inibir a redução de P . Além disso, em JJA, a redução de P é menor do que a redução de E em todos os períodos futuros. O MRN é um melhor cenário comparado ao mecanismo positivo, pois tem o papel de atenuar os efeitos das mudanças no clima decorrentes do aumento dos GEE.

De modo geral, as mudanças projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES são mais significativas na Amazônia meridional. Neste setor da bacia a redução de P é maior durante a estação chuvosa, sendo a redução de P_a o principal fator para a mudança no regime de chuvas.

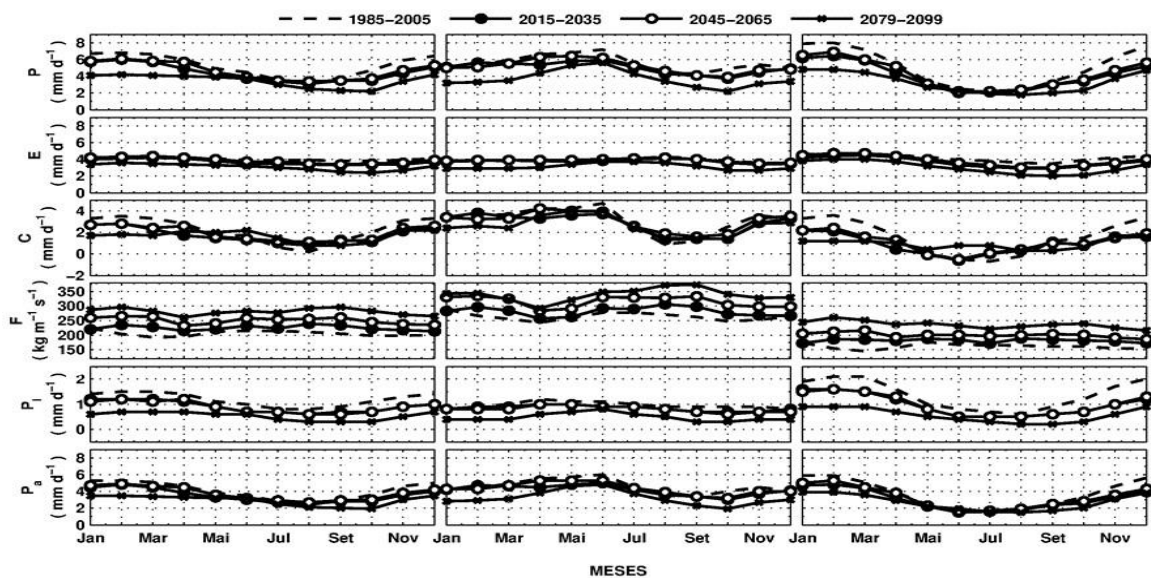


Figura 8. Média do ciclo anual dos componentes do balanço de umidade e da reciclagem de precipitação simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES para o clima presente (1985-2005) e períodos futuros (2015-2035, 2045-2065 e 2079-2099) utilizando o cenário de emissão RCP 8.5 na bacia amazônica (coluna à esquerda), Amazônia setentrional (coluna central) e Amazônia meridional (coluna à direita). Linhas de cima para baixo: 1 – precipitação total (P , mm dia⁻¹); 2 – evapotranspiração da superfície (E , mm dia⁻¹); 3 – convergência de umidade (+ C convergência e - C divergência, mm dia⁻¹); 4 – fluxo de vapor d’água integrado verticalmente (F , kg m⁻¹ s⁻¹); 5 – precipitação de origem local (P_l , mm dia⁻¹); 6 – precipitação de origem advectiva (P_a , mm dia⁻¹).

Considerações Finais

O objetivo principal deste estudo foi avaliar os efeitos da mudança do clima ao longo do século XXI sobre a precipitação na bacia amazônica, abordando os mecanismos físicos envolvidos nesse processo, utilizando o MCR Eta forçado com o cenário de emissões RCP 8.5 proveniente do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES (Chou et al., 2014).

As mudanças projetadas pelo modelo para o clima futuro mostram que, de maneira geral, os impactos nos componentes do balanço de umidade na Amazônia foram mais significativos durante a estação chuvosa (DJF) e no setor sul da bacia, principalmente, ao final do século. O *mecanismo de retroalimentação positivo (MRP)* é configurado durante o verão austral e na média anual, isto é, a redução da convergência de umidade (por meio da alteração na estrutura termodinâmica da atmosfera e na circulação regional) e da evapotranspiração da superfície agiram no mesmo sentido para reduzir a precipitação total; no entanto, o *mecanismo de retroalimentação negativo (MRN)* é caracterizado no inverno austral, em que a redução da evapotranspiração é parcialmente compensada pelo aumento da convergência de umidade, porém, não o suficiente para inibir a redução da precipitação. O MRP representa um cenário preocupante para a Amazônia, uma vez que, pode afetar a dinâmica de seus ecossistemas, que não apresentam grande capacidade de adaptação às mudanças climáticas, sobretudo, se estas ocorrerem em um curto intervalo de tempo – décadas. Entretanto, o MRN desempenha o importante papel de atenuar os efeitos das mudanças no clima decorrentes do aumento dos GEE.

A redução da precipitação total na Amazônia foi decorrente tanto da redução da precipitação de origem local quanto advectiva, sendo que a advectiva teve papel preponderante devido às mudanças na circulação regional e no transporte de umidade sobre a bacia.

Esses resultados mostram que, a mudança do clima devido ao aumento dos GEE pode afetar de forma significativa os componentes do balanço de água na bacia amazônica, implicando em graves consequências ecológicas ao bioma, tais como: afetando a dinâmica dos ecossistemas, reduzindo a capacidade da floresta em absorver o carbono da atmosfera, favorecendo a ocorrência de eventos extremos (secas e enchentes), aumentando a temperatura à superfície e, conseqüentemente, a frequência e intensidade das queimadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Dra. Sin Chan Chou, pesquisadora do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista

– São Paulo, por fornecer os dados das simulações de *downscaling* do modelo Eta-HadGEM2-ES para a América do Sul referentes ao clima presente e períodos futuros, utilizando o cenário de emissão RCP 8.5.

Referências

- Artaxo, P., Gatti, L.V., Leal, A.M.C., Longo, K.M., Freitas, S.R., Lara, L.L., Pauliquevis, T.M., Procópio, A.S., Rizzo, L.V., 2005. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazonica* 35, 185-196.
- Betts, A.K.; Miller, M.J.A. 1986. 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* 112, 693-709.
- Chou, S.C., 1996. Modelo Regional Eta. *Climanálise*, 1 (Especial Edition), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Chou, S.C., Bustamante, J.F, Gomes, J.L., 2005. Evaluation of Eta Model Seasonal Precipitation Forecasts over South America. *Nonlinear Processes in Geophysics* 12, 537-555.
- Chou, S.C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Marengo, J., 2014. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change* 3, 512-525.
- Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., Woodward, S., 2011. Development and Evaluation of an Earth-System Model-HadGEM2. *Geoscientific Model Development* 4, 1051-1075.
- Correia, F.W.S., Alvalá, R.C.S., Manzi, A.O., 2008. Modeling the impacts of land cover change in Amazonia: a regional climate model (RCM) simulation study. *Theoretical and Applied Climatology* 93, 225-244.
- Correia, F.W.S., Manzi, A.O., Cândido, L.A., Dos Santos, R.M.N, Pauliquevis, T., 2007. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. *Ciência e Cultura* 59, 39-43.

- Cox, P.M., 2001. Description of the “TRIFFID” Dynamic Global Vegetation Model. Hadley Centre, Met Office, technical note 24, 16p.
- Drumond, A., Marengo, J.A., Ambrizzi, T., Nieto, R., Moreira, L., Gimeno, L., 2014. The role of Amazon Basin moisture on the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* 11, 1023-1046.
- Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grummen, P., Koren, V., Gayno, G., Tarpley, J.D., 2003. Implementation of NOAA land surface advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108, 1-16.
- Espinoza, J.C., Marengo, J.A., Ronchail, J., Carpio, J.M., Flores, L. N., Guyot, J.L., 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters* 9, 1-9.
- Fearnside, P.M., 2005. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. *Conservation Biology* 19, 680-688.
- Fels, S.B., Schwarzkopf, M.D., 1975. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences* 32, 1475-1488.
- IPCC, 2013. (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, NY, USA, 27p.
- Janjić, Z.I., 1984. Nonlinear Advection Schemes and Energy Cascade on Semi-Staggered Grids. *Monthly Weather Review* 112, 1234-1245.
- Janjić, Z.I., 1994. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review* 122, 927-945.
- Lacis, A.A., Hansen, J.E.A., 1974. parameterization of the absorption of solar radiation in earth’s atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences* 31, 118-133.
- Malhi, Y., Roberts, J.T., Betts, R.A., Killeen, T.J., Li, W., Nobre, C.A., 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science* 319, 169-172.
- Marengo, J.A., 2005. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. *Climate Dynamics* 24, 11-22.
- Marengo, J.A., 2004. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 79-96.
- Marengo, J.A., 2006. On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 1-19.
- Marengo, J.A., Chou, S.C., Kay, G., Alves, L.M., Pesquero, J.F., Soares, W.R., Santos, D.C., Lyra, A.A., Sueiro, G., Betts, R., Chagas, D.J., Gomes, J. L., Bustamante, J.F., Tavares, P., 2012. 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* 38, 1829-1848.
- Marengo, J.A., Espinoza, J.C., 2015. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology* 36, 1033-1050.
- Marengo, J.A., Soares, W.R., Saulo, C., Nicolini, M., 2004. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *Journal of Climate* 17, 2261-2280.
- Martin, G.M., Bellouin, N., Collins, W.J., Culverwell, I.D., Halloran, P.R., Hardiman, S.C., Hinton, T.J., Jones, C.D., McDonald, R.E., McLaren, A.J., O’connor, F.M., Roberts, M.J., Rodriguez, J.M., Woodward, S., Best, M.J., Brooks, M.E., Brown, A.R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S.H., Dharsri, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J.M., Falloon, P.D., Gedney, N., Gray, L.J., Hewitt, H.T., Hobson, M., Huddleston, M.R., Hughes, J., Ineson, S., Ingram, W.J., James, P.M., Johns, T.C., Johnson, C.E., Jones, A., Jones, C.P., Joshi, M. M., Keen, A.B., Liddicoat, S., Lock, A. P., Maidens, A.V., Manners, J.C., Milton, S.F., Rae, J.G.L., Ridley, J.K., Sellar, A., Senior, C.A., Totterdell, I.J., Verhoef, A., Vidale, P.L., Wiltshire, A., 2011. The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. *Geoscientific Model Development* 4, 723-757.
- Matos, A.C., Dereczynski, C.P., Chou, S.C., Palmeira, R., 2012. Investigação do comportamento dos ciclones no clima futuro a partir do modelo regional Eta-HadCM3. In: *Congresso Brasileiro De Meteorologia, XVII, 2012, Gramado-RS. Anais...*

- Mesinger, F., 1984. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica* 44, 195-202.
- Mesinger, F., Chou, S.C., Gomes, J.L., Jovic, D., Bastos, P., Bustamante, J.F., Lazic, L., Lyra, A.A., Morelli, S., Ristic, I., Veljovic, K., 2012. An Upgraded Version of the Eta Model. *Meteorology and Atmospheric Physics* 116, 63-79.
- Nobre, C.A., Marengo, J.A., Artaxo, P., 2009a. Understanding the Climate of Amazonia: Progress From LBA. In: Keller, M., Bustamante, M., Gash, J., Silva Dias, P. (Orgs.). *Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser*, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, p. 145-147.
- Nobre, C.A., Obregón, G.O., Marengo, J.A., Fu, R., Poveda, G., 2009b. Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. In: Keller, M., Bustamante, M., Gash, J., Silva Dias, P., (Orgs.). *Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser*, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, p. 149-162.
- Nobre, C.A., Oliveira, G.S., Salazar, L.F., 2006. Climate and land use changes in Amazonia: Impacts on the hydrological cycle and biome distribution. In: *Water and Environment: Proceedings of the Workshop in the Vatican Academy of Sciences*, Nov. 2005. Vatican Press, Rome, in press.
- Pesquero, J.F., Chou, S.C., Nobre, C.A., Marengo, J.A., 2010. Climate Downscaling over South America for 1961-1970 Using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology* 99, 75-93.
- Resende, N.C., Giarolla, A., Rodrigues, D.C., Tavares, P., Chou, S.C., 2011. Ocorrência da doença ferrugem-do-café (*Hemileia vastatrix*) em algumas regiões de São Paulo, baseada nas projeções climáticas do modelo Eta/CPTEC (Cenário A1B-IPCC/SRES). In: *Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, XVII, 2011, Guarapari-ES. Anais... Guarapari: SESC Centro de Turismo de Guarapari*, p. 1-5.
- Rocha, V.M., Correia, F.W.S., Fialho, E.S., 2012. A Amazônia frente às mudanças no uso da terra e do clima global e a importância das áreas protegidas na mitigação dos impactos: Um estudo de modelagem numérica da atmosfera. *ACTA Geográfica, Ed. Esp. Climatologia Geográfica*, p. 31-48.
- Rodrigues, D.C., Tavares, P., Giarolla, A., Chou, S.C., Resende, N.C., De Camargo, M.B.P., 2011. Estimativa da ocorrência de temperatura máxima maior que 34°C durante o florescimento e maturação do cafeeiro baseado no modelo Eta/CPTEC 40km (cenário A1B). In: *Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, XVII, 2011, Guarapari-ES. Anais... Guarapari: SESC Centro de Turismo de Guarapari*, p. 1-5.
- Salazar, L.F., Nobre, C.A., Oyama, M.D., 2007. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters* 34, 1-6.
- Satyamurty, P., Da Costa, C.P.W., Manzi, A.O., 2013. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology* 111, 195-209.
- Scholze, M., Knorr, W., Arnell, N.W., Prentice, I.C., 2006. A climate change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 13116-13120.
- Vera, C., Baez, J., Douglas, M., Emanuel, C.B., Orsini, J.A.M., Meitin, J., Nicolini, M., Noguez-Paegles, J., Paegle, J., Penalba, O., Salio, P., Saulo, C., Silva Dias, M.A.F., Silva Dias, P., Zipser, E., 2006. The South American Low Level Jet Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87, 63-77.
- Zhao, Q., Black, T.L., Baldwin, M.E. 1997. Implementation of the Cloud Prediction Scheme in the Eta Model at NCEP. *Weather and Forecasting* 12, 697-712.