

# AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA RECICLAGEM DE PRECIPITAÇÃO DA AMAZÔNIA: UM ESTUDO DE MODELAGEM NUMÉRICA

ROCHA, Vinícius Machado – vinicius@inpa.gov.br  
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)

---

**RESUMO:** O presente trabalho envolvendo modelagem climática é transcrição de palestra proferida pelo autor durante o XII SBCG, realizado no mês de outubro de 2016 na cidade de Goiânia/GO. A principal ferramenta para avaliar as variabilidades e mudanças do clima são os modelos climáticos globais e regionais, capazes de representar as complexas interações entre o oceano, a atmosfera e a superfície terrestre. Com base nas simulações do modelo regional RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES, discute-se de que maneira o aumento dos gases de efeito estufa pode afetar o balanço de umidade e a reciclagem de precipitação na Amazônia durante o século XXI. Para quantificar a reciclagem de precipitação foi utilizado um método fundamentado no balanço de umidade na atmosfera. Na média anual, a reciclagem na bacia amazônica simulada pelo modelo para o clima presente é de 22%. As mudanças projetadas para o clima futuro mostram que, a redução da reciclagem é mais pronunciada na estação seca, atingindo 40% ao final do século. Os resultados sugerem que, as mudanças climáticas poderão acarretar graves consequências ecológicas à Amazônia, tais como: impactos na dinâmica dos ecossistemas, redução da capacidade da floresta em absorver carbono, aumento na ocorrência de eventos extremos e na frequência das queimadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** SBCG, modelagem climática, Amazônia, reciclagem de precipitação, balanço de umidade.

---

*ASSESSMENT OF THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON PRECIPITATION RECYCLING IN THE AMAZON BASIN: A NUMERICAL MODELING STUDY*

**ABSTRACT:** This article involving climate modeling is a full transcription of the lecture given by the author during the XII SBCG (2016), in Goiania, Brazil. The major tool to assess future climate change is the regional and global climate models. To represent climate variability, these models require having the ocean, atmosphere, and land surface in a coupled system. Based on the RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES regional model simulations, was discussed how the increase in greenhouse gases can affect the water budget and precipitation recycling in the Amazon basin during the 21<sup>st</sup> century. A method based on the atmospheric moisture balance was used to quantify precipitation recycling. On average, recycling in the Amazon basin simulated by the model for the present climate is 22%. Projected changes for the future climate show that the reduction of recycling is more significant during the dry season (40%) and at the end of the 21<sup>st</sup> century. The results suggest that climate changes could lead to severe ecological consequences to the Amazon basin, such as: negative effects on the ecosystem dynamics, reduction of forest ability to absorb carbon from the atmosphere, increase in the occurrence of extreme events and increases in the occurrence of forest fires.

**KEYWORDS:** SBCG, climate modeling, Amazon basin, precipitation recycling, water budget.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A principal ferramenta para avaliar as variabilidades e mudanças do clima são os Modelos Climáticos Globais (MCGs) integrados com diferentes cenários de emissões dos gases de efeito estufa e aerossóis e que, portanto, são capazes de representar as complexas interações entre o oceano, a

atmosfera e a superfície terrestre, assim como o ciclo do carbono no oceano e na biosfera.

Os MCGs adotados no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (IPCC AR5, 2013) tiveram suas simulações iniciadas no período industrial moderno (1850) e foram executados até 2005; a partir de 2006 realizaram-se as simulações utilizando os cenários Representation Concentration Pathway (RCP), geralmente se estabilizando em 2100. Conforme salientam Chou et al. (2014a), ao configurar-se MCGs para serem executados por um longo período a resolução do modelo se caracteriza uma restrição computacional. Geralmente, a resolução dos modelos acoplados oceano-atmosfera é cerca de 100-300 km. Apesar da complexidade dos processos físicos incorporados às versões mais recentes dos modelos globais, suas resoluções podem não ser capazes de capturar detalhes de superfícies subjacentes que são importantes para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas futuras na escala regional, por exemplo, impactos em áreas urbanas, na produção agrícola, etc. A formulação de políticas de adaptação em resposta às mudanças climáticas tem mostrado que o nível de detalhamento gerado pelos MCGs ainda não estão consolidados, por mais que forneçam simulações adequadas da circulação em escala global.

Desse modo, os Modelos Climáticos Regionais (MCRs) forçados com os MCGs fornecem os detalhes necessários para a realização dos estudos de impactos na escala regional. As características de grande escala provenientes dos MCGs são forçadas através das fronteiras dos MCRs – técnica conhecida como *downscaling*. Devido à sua resolução, os MCRs são capazes de capturar com maior precisão a amplitude dos fenômenos de mesoescala. As incertezas através dos limites laterais podem ser consideradas incluindo membros perturbados de um modelo global (*ensemble*), como em Marengo et al. (2012).

O presente artigo sobre modelagem climática é transcrição de palestra proferida pelo autor na Mesa Redonda intitulada “Base de dados e a abordagem climatológica: Levantamento, tratamento e os desafios escalares e da modelagem de cenários climáticos” durante o XII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica (SBCG), realizado no mês de outubro de 2016 na cidade de Goiânia/GO. Discute-se, com base nas simulações de um modelo com alta resolução, como a mudança do clima global pode afetar o balanço de umidade e, principalmente, a reciclagem de precipitação na bacia amazônica ao longo do século XXI.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Reciclagem de precipitação na Amazônia: Estudos observacionais

A Amazônia é a única grande extensão contínua de floresta tropical úmida da Terra, com uma área de aproximadamente 6,5 milhões de km<sup>2</sup> que corresponde a 56% das florestas tropicais do planeta, e desempenha 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 a absorção do excesso de carbono da atmosfera, o transporte de gases traço, aerossóis e vapor d’água para outras regiões do continente sul-americano e,

principalmente, a geração de chuvas locais por meio da reciclagem de precipitação (MALHI et al., 2008; NOBRE et al., 2009; SATYAMURTY et al., 2013). Considerando o 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 realizada pela própria floresta tropical. No que concerne à circulação regional, a bacia atua como uma fonte de umidade para o Centro-Sul do Brasil, incluindo a bacia do Prata, contribuindo para a ocorrência de precipitação nessas regiões (MARENGO et al., 2004; SATYAMURTY et al., 2013).

O conceito de reciclagem de precipitação refere-se ao mecanismo de retroalimentação "*feedback*" entre a superfície e a atmosfera em que a evapotranspiração local contribui, significativamente, para a precipitação total sobre uma região. Em outras palavras, a reciclagem de precipitação pode ser definida como a quantidade de água que evapotranspirada da superfície terrestre em uma determinada região retorna na forma de precipitação sobre a mesma região (BRUBAKER et al., 1993; ELTAHIR e BRAS, 1994; TRENBERTH, 1999; ROCHA et al., 2015a).

Utilizando dados observacionais e reanálises de diferentes centros meteorológicos, diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de quantificar e descrever a distribuição da reciclagem de precipitação na bacia amazônica: Molion (1975), Marques et al. (1977), Brubaker et al. (1993), Eltahir e Bras (1994), Trenberth (1999), Costa e Foley (1999), Nóbrega et al. (2005), Van der Ent et al. (2010), Satyamurty et al. (2013), entre outros. A Tabela 1 apresenta os principais resultados encontrados na literatura. A diferença nas estimativas sobre a bacia deve-se, entre outros fatores, ao método adotado para quantificar a reciclagem e a fonte de dados utilizada no estudo.

Os resultados desses estudos, apesar de apresentarem diferenças quantitativas, demonstram que o mecanismo de reciclagem é um forte indicador da importância dos processos de superfície e do clima no ciclo hidrológico, assim como da sensibilidade climática relacionada às alterações nesses processos. Atualmente, estima-se que a reciclagem de precipitação na bacia amazônica é da ordem de 20-35%. Ainda que a maior parte da umidade necessária para gerar as chuvas na Amazônia seja proveniente de fora da região (oceanos adjacentes), a contribuição da evapotranspiração local para a precipitação total sobre a bacia – reciclagem de precipitação – representa uma porção significativa do balanço de água regional e desempenha um importante papel no ciclo hidrológico amazônico, influenciando os padrões espaciais de umidade do solo, a produtividade e a ocorrência de eventos extremos, tais como secas e enchentes (SATYAMURTY et al., 2013; ROCHA et al., 2015a). Embora os estudos sobre reciclagem de precipitação na Amazônia tenham produzido novos conhecimentos acerca da interação entre os processos de superfície e o ciclo hidrológico, os efeitos da variabilidade e mudanças do clima nesse mecanismo ainda não estão completamente compreendidos.

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 na atmosfera e as mudanças de uso e cobertura da terra como, por exemplo, desflorestamento, atividades agrícolas e urbanização (MARENGO

et al., 2012; ROCHA et al., 2012; ROCHA et al., 2015b). Essas ações antropogênicas podem colocar em risco o funcionamento dos ecossistemas amazônicos, reduzindo a capacidade de capturar o carbono da atmosfera, aumentando a temperatura à superfície, reduzindo a umidade do solo, enfraquecendo o ciclo hidrológico regional e, conseqüentemente, afetando a reciclagem de precipitação.

**Tabela 1.** Média anual da reciclagem de precipitação na Amazônia. Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2015a).

Estudos	Amazônia	Método e dados
Molion (1975) e Marques et al. (1977)	56% 50%	Observações de precipitação, vazões dos rios e dados de radiossondagem.
Brubaker et al. (1993)	24%	Modelo de Budyko reformulado em duas dimensões e dados observados.
Eltahir e Bras (1994)	25% 35%	Modelo bi-dimensional. Dados: ECMWF <sup>1</sup> (25%) e GFDL <sup>2</sup> (35%).
Trenberth (1999)	34%	Modelo de Brubaker com base na escala de comprimento <i>L</i> de 2750 km. Dados do CMAP <sup>3</sup> , NVAP <sup>4</sup> e NCEP <sup>5</sup> .
Costa e Foley (1999)	20%	Modelo de Eltahir e Bras, cálculo do fluxo de entrada em cada célula de grade, reanálises do NCEP 1976-1996.
Nóbrega et al. (2005)	24%	Modelo de Trenberth e as reanálises do NCEP (1978-1998).
Van der Ent et al. (2010)	28%	Reanálises do ECMWF (ERA-Interim, 1999-2008).
Satyamurty et al. (2013)	30%	Reanálises do NCEP (1978-2010).

Apesar das mudanças projetadas no ciclo hidrológico da Amazônia ao longo do século XXI pelos modelos globais adotados no Quarto e Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC AR4, 2007; IPCC AR5, 2013) utilizando os cenários de emissões Special Report on Emissions Scenarios – SRES e Representative Concentration Pathways – RCPs, respectivamente, assim como pelos cenários regionalizados para a América do Sul com o modelo regional Eta, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, forçado com o cenário SRES A1B produzido a partir de quatro membros do modelo global HadCM3 do Met Office Hadley Centre – MOHC (MARENGO et al., 2012) e com os cenários RCPs 4.5 e 8.5 provenientes do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES (CHOU et al., 2014b), ainda não se sabe quais as implicações que as mudanças no clima futuro podem promover na reciclagem de precipitação sobre a bacia amazônica e quais mecanismos físicos contribuirão para alterar a reciclagem.

<sup>1</sup>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

<sup>2</sup>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.

<sup>3</sup>Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation.

<sup>4</sup>NASA Water Vapor Project.

<sup>5</sup>National Centers for Environmental Prediction.

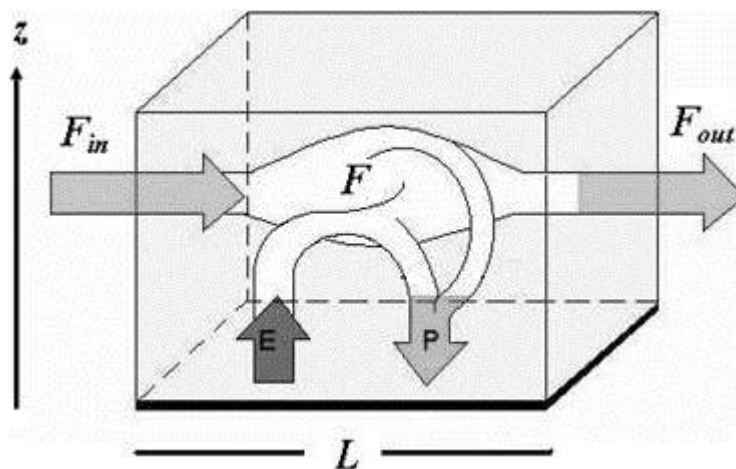
Diante dos potenciais impactos no ciclo hidrológico da Amazônia decorrentes da mudança do clima global, previstos pelos modelos climáticos, uma importante questão em pauta na ciência climática é: "De que maneira a mudança do clima, devido ao aumento na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, pode afetar o balanço de umidade e, principalmente, a reciclagem de precipitação na bacia amazônica durante o século XXI?". Com o intuito de esclarecer esta problemática, desenvolveu-se um estudo de modelagem numérica em que o modelo regional Eta é forçado com o cenário RCP 8.5 proveniente do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES (CHOU et al., 2014b). Para quantificar a reciclagem de precipitação foi adotado o método fundamentado no balanço de umidade na atmosfera descrito por Brubaker et al. (1993) e Trenberth (1999).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Método da reciclagem de precipitação

Diferentes abordagens são utilizadas na formulação de métodos para quantificar a reciclagem de precipitação. Os métodos pautados no balanço de umidade da atmosfera, por exemplo, fazem uso de dados de estações meteorológicas, reanálises ou simulações de modelos atmosféricos. Entretanto, métodos baseados na trajetória de moléculas de água na atmosfera desde sua fonte de origem até a ocorrência de precipitação também são utilizados. Neste estudo, o método adotado para quantificar a reciclagem de precipitação é o proposto por Brubaker et al. (1993) e Trenberth (1999) e baseia-se no balanço de umidade da atmosfera.

O método descrito por Brubaker et al. (1993) e Trenberth (1999) define que, considerando a escala de comprimento  $L$ , a evapotranspiração  $E$  e a precipitação total  $P$  em uma determinada região, os fluxos de vapor d'água integrado na vertical que entra ( $F_{in}$ ) e sai ( $F_{out}$ ) dessa região (Figura 1) podem ser determinados pela Equação 1:



**Figura 1.** Modelo conceitual dos processos considerados na reciclagem de precipitação:  $P$  precipitação total ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $E$  evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $F_{in}$  e  $F_{out}$  são os fluxos de vapor d'água integrado na vertical ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) que entra e sai da região, respectivamente;  $F$  fluxo de umidade médio na área ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $L$  escala de comprimento (km). Fonte: Adaptado de Brubaker et al. (1993).

$$F_{out} = F_{in} + (E - P)L \quad (1)$$

Onde o fluxo horizontal médio do vapor d'água na área é definido como:

$$F = 0,5(F_{in} + F_{out}) = F_{in} + 0,5(E - P)L \quad (2)$$

No método proposto por Brubaker et al. (1993) e Trenberth (1999), a precipitação total ( $P$ ) na região é particionada em precipitação de origem local ( $P_l$ ) e precipitação de origem advectiva ( $P_a$ ), ou seja:

$$P = P_l + P_a \quad (3)$$

Dessa forma, o fluxo horizontal médio proveniente da umidade advectada para a região é dado por:

$$F_{in} - 0,5P_a L \quad (4)$$

E o fluxo horizontal médio oriundo da evapotranspiração local é dado por:

$$0,5(E - P_l)L \quad (5)$$

Assumindo que a atmosfera é bem misturada, de maneira que a razão da precipitação proveniente da advecção *versus* aquela decorrente da evapotranspiração é proporcional à razão entre o fluxo de umidade advectado e o evapotranspirado, então, tem-se a seguinte expressão:

$$\frac{P_a}{P_l} = \frac{F_{in} - 0,5P_a L}{0,5(E - P_l)L} \quad (6)$$

Logo, a reciclagem de precipitação ( $\beta$ ) pode ser determinada por:

$$\beta = \frac{P_l}{P} = \frac{EL}{EL + 2F_{in}} \quad (7)$$

Utilizando a Equação 2, a reciclagem de precipitação ( $\beta$ ) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\beta = \frac{EL}{PL + 2F} \quad (8)$$

Portanto, o pressuposto básico deste método é que a atmosfera é bem misturada e a mudança no armazenamento de umidade na atmosfera é desprezível em comparação aos outros termos. Brubaker et al. (1993) e Trenberth (1999) recomendam que para a bacia amazônica seja utilizada a escala de comprimento  $L = 2.750$  km na estimativa da reciclagem.

### 3.2. Cenário 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 AR5, 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 gases de efeito estufa, denominados Representative Concentration Pathway (RCP) cenários. Os quatro diferentes cenários são definidos como: RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 e RCP 2.6, que correspondem às forçantes radiativas de  $8.5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $6.0 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $4.5 \text{ Wm}^{-2}$  e  $2.6 \text{ Wm}^{-2}$ , respectivamente. O primeiro (último) RCP é o mais pessimista (otimista) e resulta em um aquecimento médio global de, aproximadamente,  $4^\circ\text{C}$  ( $1^\circ\text{C}$ ) ao final do século XXI.

### 3.3. Os modelos

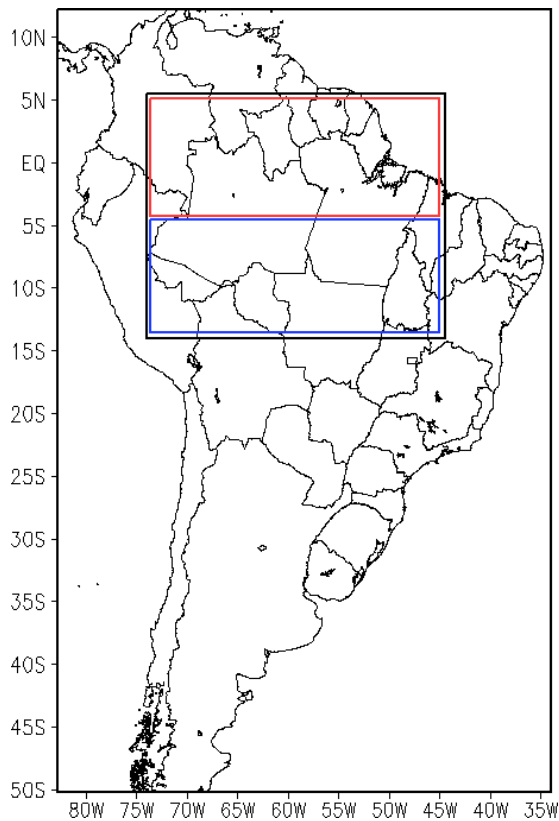
Neste estudo foram utilizados os cenários de clima futuro (RCP 8.5) produzidos pelo modelo global acoplado do sistema terrestre HadGEM2-ES (MOHC) e regionalizado para a América do Sul com o MCR Eta (INPE).

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  $30^\circ$ . 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 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 (JANJÍĆ, 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.

### 3.4. 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., 2014b). Para o clima presente, correspondendo ao período de 1961 a 2005, a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foi constante, mantendo-se 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 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 2).



**Figura 2.** Domínio do modelo. Bacia amazônica, limite em preto; Amazônia setentrional, limite em vermelho; e Amazônia meridional, limite em azul.

#### 4. 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 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, evapotranspiração da superfície, transporte de vapor d'água e convergência de umidade integrada verticalmente) e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica (Figura 2). A avaliação dos impactos nos componentes do balanço de umidade na



Amazônia faz-se necessária, uma vez que, a reciclagem de precipitação está diretamente associada às variações espaço-temporais desses componentes.

#### 4.1. Precipitação e evapotranspiração

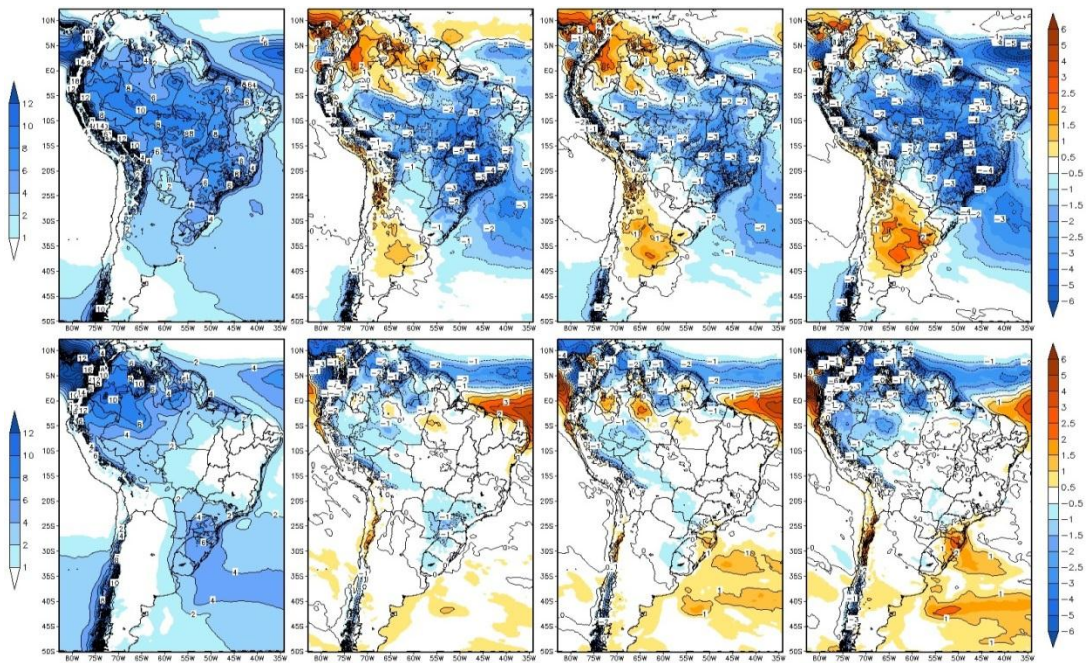
As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as mudanças nos campos médios da precipitação e evapotranspiração em relação ao período de 1985 a 2005, projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES para os três períodos futuros (2015-2035, 2045-2065 e 2079-2099) durante o verão (DJF) e inverno (JJA) austral.

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 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 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).

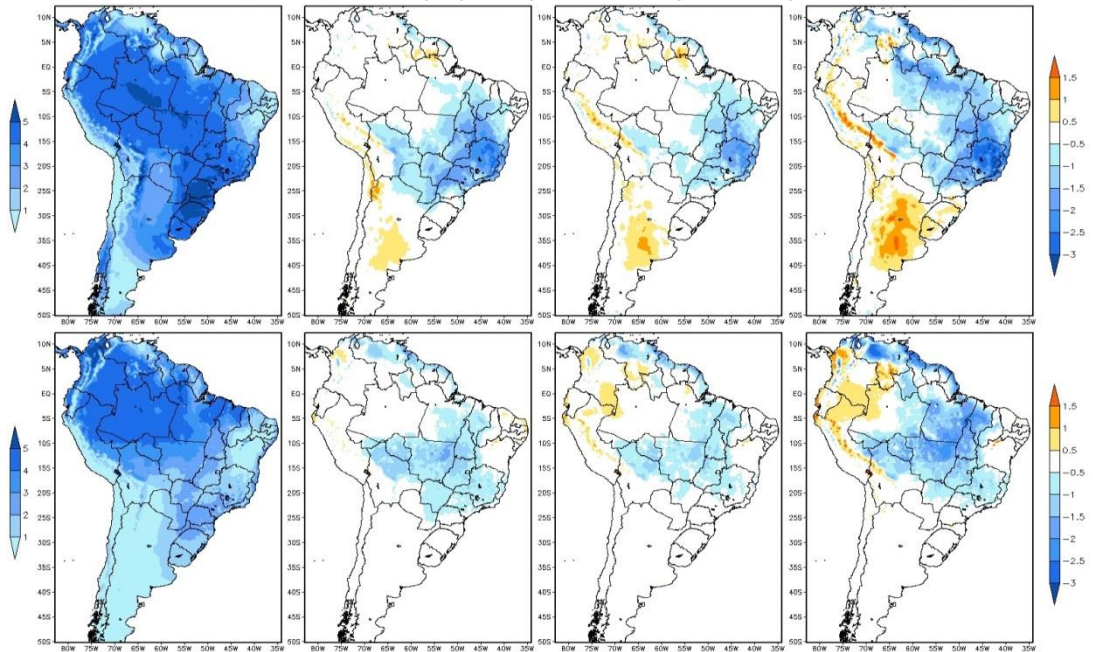
Em JJA, com a migração da ZCIT em direção às latitudes setentrionais, a redução na precipitação ocorre, principalmente, no setor norte do continente. Por outro lado, é projetado para o final do século um aumento da precipitação no SEAS, porém, limitada às áreas próximas ao litoral sul do Brasil. Na bacia 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, conseqüentemente, 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. (2014b) 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 3.** Distribuição média da precipitação ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) 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.



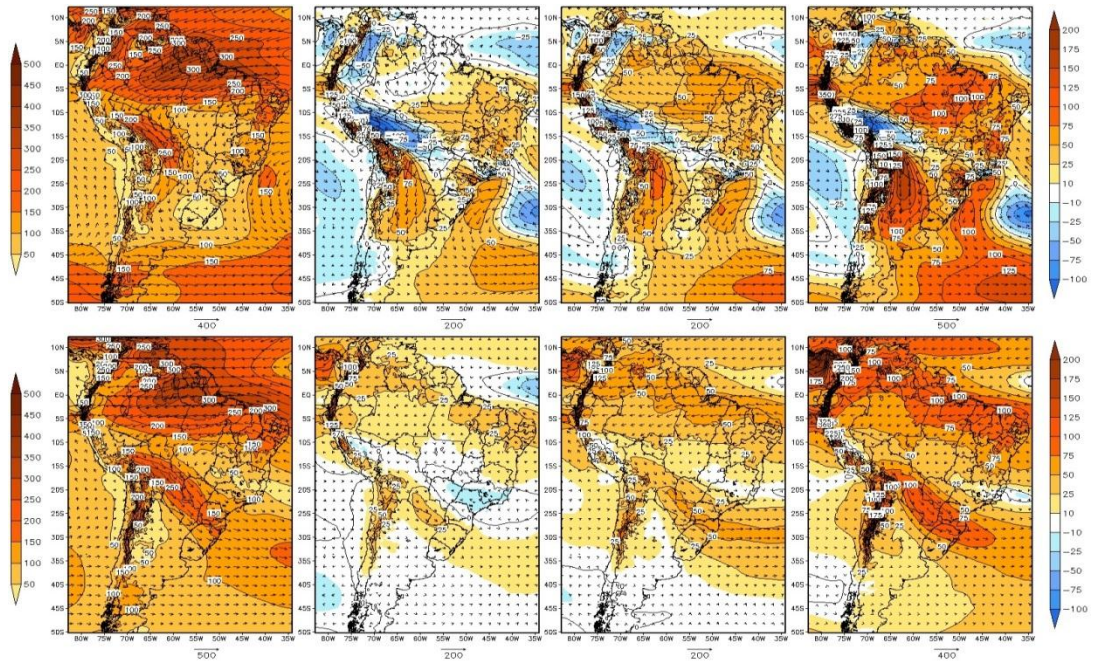
**Figura 4.** Distribuição média da evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para o clima presente e a diferença entre os períodos futuros e o clima presente projetada pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES em DJF (linha superior) e JJA (linha inferior). Colunas da esquerda para a direita: 1 – clima presente (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.

#### 4.2. Transporte e convergência de umidade

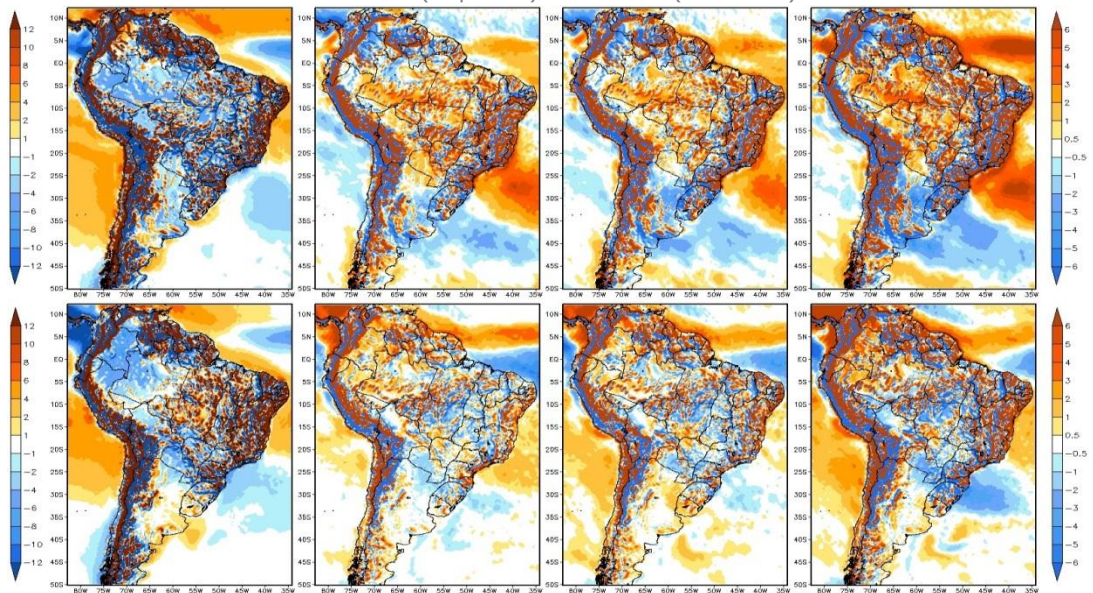
As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, as mudanças nos campos médios do fluxo e da convergência do vapor d'água integrado verticalmente, projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES. De maneira geral, um padrão da circulação equatorial durante o verão austral são os ventos alísios que, associados à intensificação da alta subtropical do Atlântico Norte, transportam umidade para o interior da bacia amazônica e do continente. Segundo Satyamurty et al. (2013), 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 5). 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 6) 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  $\text{mm dia}^{-1}$ . 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 5). 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 6).



**Figura 5.** 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 6.** Distribuição média da convergência de umidade ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) 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.

### 4.3. Reciclagem de precipitação

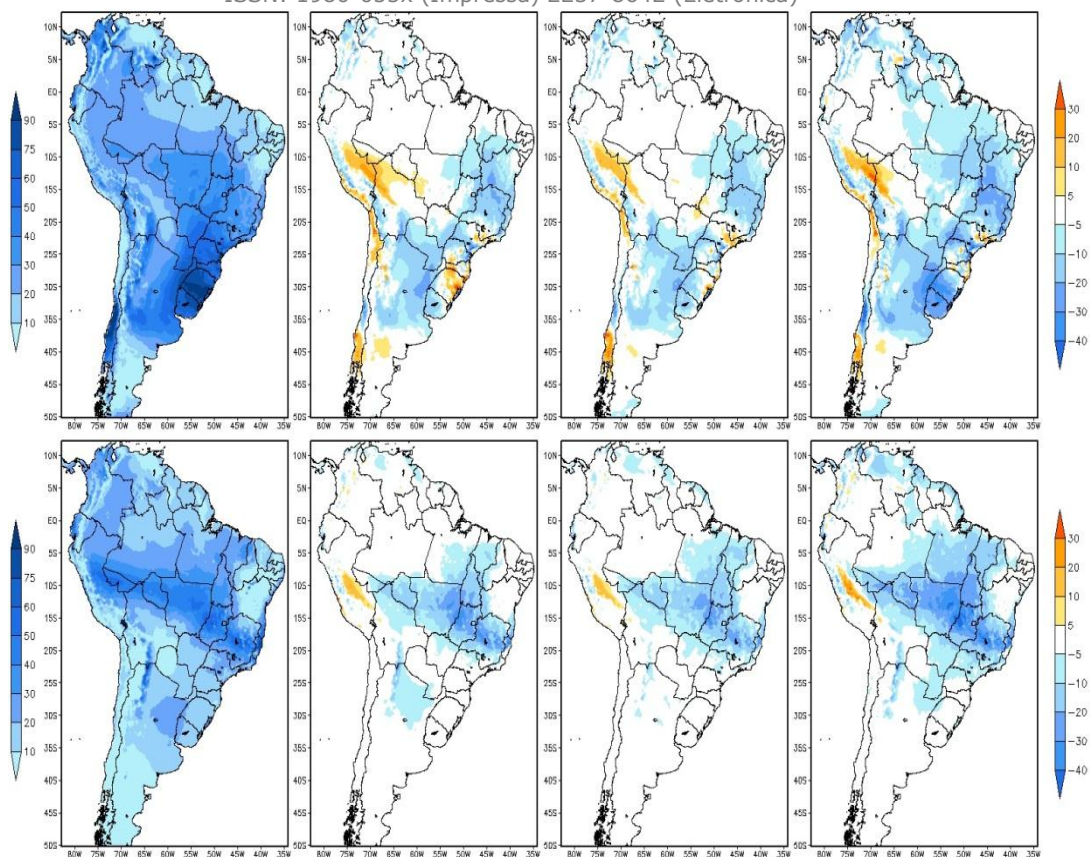
Os estudos sobre reciclagem de precipitação tem demonstrado que o mecanismo é fortemente influenciado pela precipitação total, evapotranspiração da superfície e pelo transporte de vapor d'água sobre a região. A umidade que da origem à precipitação sobre regiões continentais é proveniente de duas fontes: (i) advecção de vapor d'água oriundo de outras regiões por meio de movimentos de massas de ar e (ii) o vapor d'água local por meio da evapotranspiração da superfície da própria região. O transporte de umidade para a região depende da dinâmica atmosférica e das fontes de origem da umidade. A evapotranspiração, por sua vez, depende da disponibilidade de umidade na área ou abaixo da superfície (zona insaturada), que é evaporada diretamente ou através da transpiração da vegetação. Consequentemente, mudanças de uso e cobertura da terra e do clima que modifiquem esses processos pode afetar a quantidade de precipitação total sobre a região, assim como a reciclagem.

A Figura 7 apresenta a distribuição média da reciclagem de precipitação em DJF e JJA simulada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES para o clima presente e as mudanças projetadas utilizando o cenário de emissões RCP 8.5 para os três períodos futuros. De modo geral, a reciclagem de precipitação simulada pelo modelo para o clima presente é mais pronunciada sobre a porção centro-sul do continente, sendo diretamente influenciada pela evapotranspiração da superfície dessa região. Na América do Sul, os valores médios da reciclagem de precipitação variaram entre 10% e 80%, com índices extremos da ordem de 70% a 80% no sul do Brasil. Em DJF, a reciclagem de precipitação apresentou

valores maiores (menores) no setor sul (norte) da bacia amazônica, associados à desintensificação (intensificação) do transporte de umidade. Os valores da reciclagem na Amazônia variaram entre 17% e 27% sobre os setores norte e sul da bacia, respectivamente. Além disso, os valores da reciclagem de precipitação na bacia amazônica tendem a aumentar de leste para oeste devido à redução da intensidade do fluxo de vapor d'água para oeste. Em JJA, o aumento na intensidade do transporte de umidade foi preponderante para a redução da reciclagem sobre a porção norte da bacia (18%). Entretanto, na porção sul os valores da reciclagem (30%) foram determinados pela evapotranspiração e, também, pela redução do fluxo de umidade na região.

As mudanças projetadas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES utilizando o cenário RCP 8.5 para o clima futuro mostram que, em DJF, a reciclagem de precipitação reduziu na bacia do Prata, nas regiões Sudeste e Nordeste do Brasil, estendendo-se para a Amazônia oriental ao final do século. Em JJA, a redução da reciclagem ocorreu no sudeste e centro-oeste do Brasil e sul da Amazônia. Na bacia amazônica a reciclagem de precipitação reduziu em todos os períodos futuros, com impactos mais (menos) significativos na estação seca (úmida) e ao final do século, 40% (30%). Na média anual, a redução da reciclagem foi da ordem de 10%, 16% e 35% no início, meados e final do século, respectivamente. Em termos regionais as principais mudanças ocorreram na porção sul da bacia: redução da ordem de 50% durante a estação seca e ao final do século. Considerando toda a bacia amazônica, a redução da evapotranspiração e o aumento do fluxo de umidade contribuíram para a redução da reciclagem; entretanto, em termos relativos, o efeito do aumento do fluxo de umidade é preponderante. Esse padrão também é observado em ambas as sub-bacias.





**Figura 7.** Distribuição média da reciclagem de precipitação média (%) 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.

**Tabela 2.** Mudanças médias sazonais (em %) de DJF, verão austral, e JJA, inverno austral, e anual dos componentes do balanço de umidade – precipitação total ( $P$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ), evapotranspiração da superfície ( $E$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ), convergência de umidade ( $C$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) e fluxo de vapor d’água integrado verticalmente ( $F$ ,  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) – e da reciclagem de precipitação ( $RP$ , %) 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 Amazônia.

Período	1985-2005			2015-2035			2045-2065			2079-2099		
	DJF	JJA	Anual	DJF	JJA	Anual	DJF	JJA	Anual	DJF	JJA	Anual
P	6,6	3,8	5,3	-17%	-10%	-16%	-14%	-4%	-11%	-37%	-20%	-35%
E	4,2	3,9	4,0	-6%	-11%	-8%	-2%	-7%	-4%	-19%	-23%	-24%
C	3,4	0,8	2,2	-22%	+24	-22%	-20%	+48%	-13%	-44%	+80%	-25%
F	209	213	205	+6%	+9%	+9%	+21%	+20%	+22%	+35%	+33%	+36%
RP	21	23	22	-5%	-15%	-10%	-10%	-21%	-16%	-29%	-40%	-35%

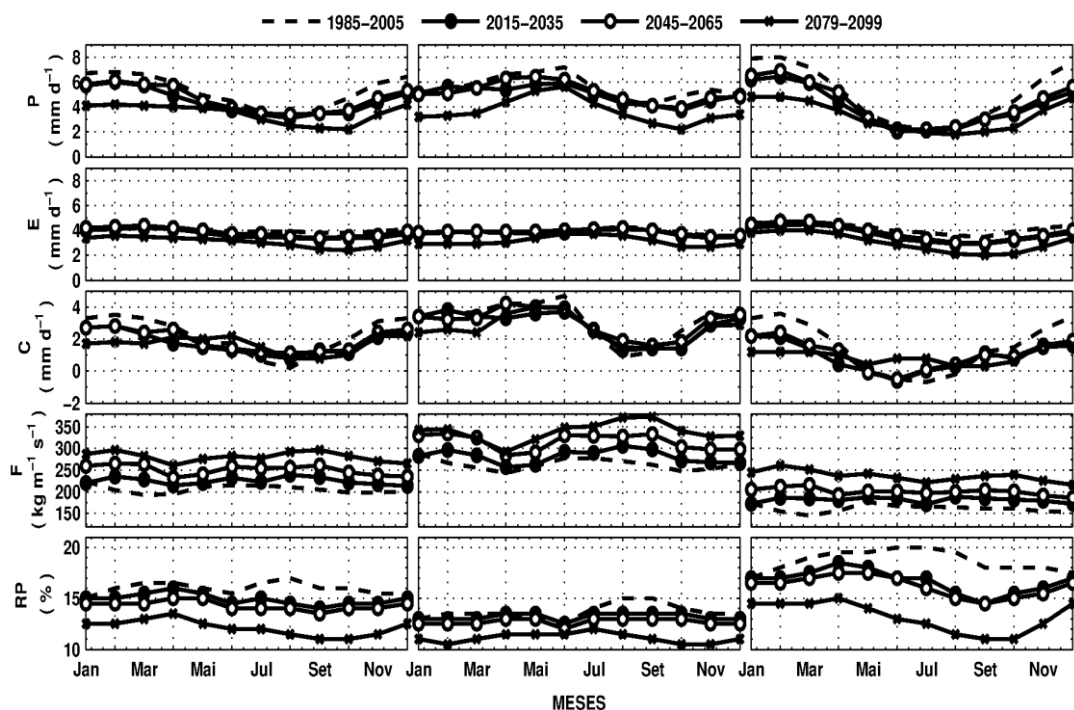
#### 4.4. Balanço de umidade e ciclo anual

A Tabela 2 apresenta as mudanças médias sazonais para o verão e inverno austral, e anual dos componentes do balanço de umidade – precipitação total (P), evapotranspiração da superfície (E), convergência de umidade (C) e fluxo de vapor d'água integrado verticalmente (F) – e da reciclagem de precipitação (RP) projetadas pelo modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES na bacia amazônica para os três períodos futuros (2015-2035, 2045-2065 e 2079-2099), em relação ao clima presente (1985-2005).

De maneira geral, a redução de P é mais (menos) pronunciada durante a estação chuvosa (seca). A mudança no clima da Amazônia 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 da 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 (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 do clima decorrentes do aumento dos gases de efeito estufa. A redução da RP ocorre nos três períodos futuros e em ambas as estações, estando associada à redução de E, mas, principalmente, ao aumento de F sobre a bacia; no entanto, a mudança na reciclagem de precipitação é mais pronunciada durante a estação seca e, sobretudo, ao final do século.

A Figura 8 apresenta o ciclo anual dos componentes do balanço de umidade e da reciclagem de precipitação na bacia amazônica e em seus setores norte e sul. De modo 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. A sazonalidade de P é mais pronunciada na Amazônia meridional e está associada à oscilação no sentido norte-sul da ZCIT. No entanto, as mudanças na P são mais significativas durante a estação chuvosa. Considerando o ciclo anual de F e da RP, verifica-se que, de maneira geral, a reciclagem de precipitação é inversamente proporcional à intensidade do transporte de vapor d'água, isto é, quanto maior o fluxo de umidade sobre a Amazônia menor é a reciclagem de precipitação. O ciclo anual da RP é maior na Amazônia meridional nos três períodos futuros e está associado ao transporte de umidade menos intenso neste setor da bacia. A redução da RP é verificada em todos os meses e períodos, sendo influenciada pela diminuição da evapotranspiração da floresta, mas, sobretudo, pela intensificação do fluxo de umidade sobre a região.





**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 ( $P$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ); 2 – evapotranspiração da superfície ( $E$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ); 3 – convergência de umidade (+ $C$ ) e divergência (- $C$ ) ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); 4 – fluxo de vapor d’água integrado verticalmente ( $F$ ,  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ); 5 – reciclagem de precipitação ( $RP$ , %).

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho envolvendo modelagem numérica é transcrição de palestra proferida pelo autor durante o XII SBCG, realizado em outubro de 2016 na cidade de Goiânia/GO. A principal ferramenta para avaliar as variabilidades e mudanças do clima são os modelos climáticos globais e regionais, capazes de representar as complexas interações entre o oceano, a atmosfera e a superfície terrestre. Com base nas simulações do modelo regional Eta forçado com o cenário RCP 8.5 proveniente do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES, discutiu-se de que maneira o aumento na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera pode afetar o balanço de umidade e a reciclagem de precipitação na Amazônia durante o século XXI. Para quantificar a reciclagem de precipitação foi adotado o método fundamentado no balanço de umidade na atmosfera descrito por Brubaker et al. (1993) e Trenberth (1999). Diversos estudos desenvolvidos anteriormente utilizando dados observacionais e reanálises de diferentes centros meteorológicos estimaram que, atualmente, a reciclagem de precipitação na Amazônia é da ordem de 20-35%. Todavia, os

efeitos da variabilidade e mudanças do clima sobre a reciclagem não foram considerados, portanto, necessitam ser avaliados. Na média anual, a reciclagem de precipitação na bacia simulada pelo modelo para o clima presente (1985-2005) é de 22%, corroborando com os resultados encontrados na literatura, apresentando variação espacial e sazonal, com valores mais intensos na Amazônia meridional (27%).

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 e, sobretudo, 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 da mudança do clima decorrente do aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera. De modo geral, a redução da reciclagem de precipitação é mais pronunciada na estação seca, atingindo 40% ao final do século, sendo diretamente influenciada pela redução da evapotranspiração da superfície, mas, principalmente, pela intensificação do fluxo de umidade sobre a bacia. No entanto, a mudança na reciclagem é maior sobre a Amazônia meridional – redução da ordem de 50% ao final do século, em JJA. Esses resultados sugerem que, a mudança do clima devido ao aumento dos gases de efeito estufa pode afetar de forma significativa os componentes do balanço de umidade e a reciclagem de precipitação na bacia amazônica, implicando em graves consequências ecológicas ao bioma, tais como: influenciando 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

Gostaria de agradecer à Comissão Organizadora do XII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica (SBCG) pelo convite para compor a Mesa Redonda “Base de dados e a abordagem climatológica: Levantamento, tratamento e os desafios escalares e da modelagem de cenários climáticos”, na condição de palestrante, e à Dra. Sin Chan Chou, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por fornecer os dados das simulações de *downscaling* do modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES para a América do Sul referentes ao clima presente e cenários futuros.

## 6. REFERÊNCIAS

- 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.
- BRUBAKER, K.L.; ENTEKHABI, D.; EAGLESON, P.S. Estimation of Continental Precipitation Recycling. *Journal of Climate*, v. 6, p. 1077-1089, 1993.
- 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.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 438-454, 2014a.
- 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. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-525, 2014b.
- 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. Development and Evaluation of an Earth-System Model-HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, v. 4, p. 1051-1075, 2011.
- COSTA, M.H.; FOLEY, J.A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, p. 14189-14198, 1999.
- COX, P.M. *Description of the "TRIFFID" Dynamic Global Vegetation Model*. Met Office, UK: Hadley Centre technical note 24, 2001.
- EK, M.B.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUMMEN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J.D. Implementation of NOAA land surface advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 108, n. D22, p. 1-16, 2003.
- ELTAHIR, E.A.B.; BRAS, R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 120, p. 861-880, 1994.
- FELS, S.B.; SCHWARZKOPF, M.D. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 32, n. 7, p. 1475-1488, 1975.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M.; Miller, H.L. (Eds). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*

*Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K. and New York, USA: Cambridge University Press, 2007, 18pp.

IPCC (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, U.K. and New York, USA: Cambridge University Press, 2013, 27pp.

JANJIĆ, Z.I. Nonlinear Advection Schemes and Energy Cascade on Semi-Staggered Grids. *Monthly Weather Review*, v. 112, p. 1234-1245, 1984.

JANJIĆ, Z.I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, v. 122, n. 927-945, 1994.

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, n. 1, p. 118-133, 1974.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R.A.; KILLEEN, T.J.; LI, W.; NOBRE, C.A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, v. 319, p. 169-172, 2008.

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. 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, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, J.A.; SOARES, W.R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *Journal of Climate*, v. 17, p. 2261-2280, 2004.

MARQUES, J.; SANTOS, J.M.; VILLA NOVA, N.A.; SALATI, E. Precipitable water and water vapor flux between Belem and Manaus. *Acta Amazonica*, v. 7, p. 355-362, 1977.

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.; DHARSSI, 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. The HadGEM2

Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. *Geoscientific Model Development*, v. 4, p. 723-757, 2011.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, v. 44, n. 1-4, p. 195-202, 1984.

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. An Upgraded Version of the Eta Model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 116, p. 63-79, 2012.

MOLION, L.C.B. *A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects*. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, USA, 1975.

NOBRE, C.A.; OBREGÓN, G.O.; MARENGO, J.A.; FU, R.; POVEDA, G. Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Eds). *Amazonia and Global Change*. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books. Geophysical Monograph Ser, vol. 186, 2009, p. 149-162.

NÓBREGA, R.S.; CAVALCANTI, E.P.; SOUZA, E.P. Reciclagem de vapor d'água sobre a América do Sul utilizando reanálises do NCEP-NCAR. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, p. 253-262, 2005.

ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; FIALHO, E.S. 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, 2012.

ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; FONSECA, P.A.M. Reciclagem de precipitação na Amazônia: Um estudo de revisão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, p. 59-70, 2015a.

ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; SATYAMURTY, P.; FREITAS, S.R.; MOREIRA, D.S.; SILVA, P.R.T.; FIALHO, E.S. Impacts of land cover and greenhouse gas (GHG) concentration changes on the hydrological cycle in Amazon basin: A regional climate model study. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 15, p. 7-27, 2015.

SALAZAR, L.F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M.D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, v. 34, p. 1-6, 2007.

SATYAMURTY, P.; da COSTA, C.P.W.; MANZI, A.O. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology*, v.111, n.1-2, p.195-209, 2013.

SCHOLZE, M.; KNORR, W.; ARNELL, N.W.; PRENTICE, I.C. A climate change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, p. 13116-13120, 2006.

TRENBERTH, K.E. Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. *Journal of Climate*, v. 12, p. 1368-1381, 1999.

VAN DER ENT, R.J.; SAVENIJE, H.H.G.; SCHAEFLI, B.; STEELE-DUNNE, S.C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resour Research*, v. 46, p. 1-12, 2010.

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.