


Artigo

Avaliação do Brazilian Global Atmospheric Model na Simulação dos Componentes do Balanço de Água na Bacia Amazônica

Rildo Gonçalves de Moura^{1#} , Francis Wagner Silva Correia², José Augusto Paixão Veiga²,
Vinícius Buscioli Capistrano², Paulo Yoshio Kubota³

¹*Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil.*

²*Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, AM, Brasil.*

³*Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.*

Recebido em: 16 de Dezembro de 2019 - Aceito em: 22 de Junho de 2020

Resumo

Nesse estudo avaliou-se o desempenho do *Brazilian Global Atmospheric Model (BAM)* na representação dos componentes do balanço de água na bacia Amazônica para o clima presente (1979-2015). Os resultados mostram que o modelo BAM reproduz a variação espaço-temporal dos componentes do balanço de água na bacia Amazônica, apesar da deficiência em posicionar corretamente os máximos de precipitação e convergência de umidade sobre a região. O BAM subestimou a precipitação (8,8%) e o escoamento superficial (36,8%), e superestimou a evapotranspiração (5,3%). O comportamento de sumidouro de umidade foi bem representado pelo BAM, pois a precipitação é sempre maior que a evapotranspiração ($P > E$) na bacia Amazônica. O não fechamento do balanço de água (52,6%) na bacia mostra a limitação das parametrizações físicas do BAM na representação da convecção (precipitação) e convergência de umidade, comprovando a necessidade de melhores ajustes e calibração. De maneira geral, apesar de subestimar a precipitação, o BAM simulou adequadamente a precipitação anual e sazonal. A evapotranspiração foi superestimada, principalmente na estação chuvosa, porém foi subestimada na estação seca. Os resultados mostraram que o BAM necessita de ajustes e calibração na representação de processos de superfície, uma vez que, apresentou dificuldade na simulação da variação sazonal da evapotranspiração. Os erros sistemáticos encontrados nos componentes do balanço de água são de grande importância para determinação do grau de confiança para simulações do clima presente e projeções futuras.

Palavras-chave: Bacia Amazônica, balanço de água, Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM).

Evaluation of the Brazilian Global Atmospheric Model in the Simulation of the Water Budget Components in the Amazon Basin

Abstract

This study evaluated the performance of the *Brazilian Global Atmospheric Model (BAM)* in the representation of water balance components in the Amazon basin for the present climate (1979-2015). The BAM model reproduces the space-temporal variation of the water balance components in the Amazon basin, despite the deficiency in correctly positioning the maximum precipitation and moisture convergence over the region. BAM underestimated precipitation (8,8%) and runoff (36,8%), and overestimated evapotranspiration (5,3%). Moisture sink behavior was well represented by BAM, since precipitation is always greater than evapotranspiration ($P > E$) in the Amazon basin. The non-closure of the water budget (52,6%) in the basin shows the limitation of BAM physical parameters in the representation of convection (precipitation) and moisture convergence, proving the need for better adjustments. Overall, despite underestimating rainfall, BAM adequately simulated annual and seasonal rainfall. The evapotranspiration was overestimated, especially in the rainy season, but was underestimated in the dry season. The results showed that BAM needs adjustments and calibration in the representation of surface processes, since it presented difficulty in simulating the seasonal variation of evapotranspiration. Systematic errors found in water balance components are of great importance in determining the degree of confidence for present climate simulations and future projections.

Keywords: Amazon Basin, water balance, Brazilian Global Atmospheric Model (BAM).

[#]Autor de correspondência: Rildo Gonçalves de Moura. E-mail: rildogmoura@gmail.com.

1. Introdução

Devido à sua grande extensão, a maior floresta tropical úmida do planeta - floresta Amazônica - exerce papel importante no balanço de água entre a superfície e a atmosfera em escalas regional e global (Grace *et al.*, 1996; Marengo 2005; Marengo 2006; Satyamurty *et al.*, 2013; Rocha *et al.*, 2015). A intensa ciclagem de precipitação e o fornecimento de umidade para a atmosfera contribuem para a manutenção do regime hidrológico, não somente para a bacia Amazônica, mas também para outras regiões do continente sul-americano (Phillips *et al.*, 2008; Malhi *et al.*, 2008; Satyamurty *et al.*, 2013). Na média, a bacia Amazônica comporta-se como sumidouro de umidade (precipitação maior que evapotranspiração), recebendo vapor de água tanto da floresta tropical, por meio da reciclagem de precipitação (Trenberth 1999; Nascimento *et al.*, 2016), quanto por meio do transporte de umidade proveniente do Oceano Atlântico tropical (Rocha *et al.*, 2015). No contexto da circulação regional, a floresta Amazônica é uma importante fonte de umidade para as regiões central-sul do Brasil e bacia do Prata, desempenhando papel fundamental no regime de precipitação em regiões remotas da bacia (Nascimento *et al.*, 2016; Rocha *et al.*, 2017).

Desde o fim da década de 1970, vários estudos de balanço de água têm sido realizados na região utilizando-se uma variedade de técnicas, dados observados e de reanálises (Molion 1975; Salati, 1979; Salati e Marques 1984; Rao *et al.*, 1996; von Randow *et al.*, 2004; Marengo 2005; da Rocha *et al.*, 2009; Nascimento *et al.*, 2016; Rocha *et al.*, 2017). da Rocha *et al.* (2009) utilizaram dados observados em torres micrometeorológicas durante o Experimento de Grande Escala da Biosfera Atmosfera na Amazônia - LBA (Avissar e Nobre, 2002) a fim de entender a variação da umidade e precipitação em áreas de floresta e pastagem. Os autores observaram uma taxa de evapotranspiração da ordem de 4 mm dia^{-1} na região de floresta durante a estação seca. Enquanto que von Randow *et al.* (2004), também utilizando dados do LBA, observaram valores de evapotranspiração da ordem de $3,7 \text{ mm dia}^{-1}$ na Reserva Biológica do Jaru-RO (sítio de floresta). Apesar dos diferentes experimentos realizados na Amazônia, a escassez de medidas hidrometeorológicas de superfície e de ar superior dificultam a geração de informações necessárias para o desenvolvimento de estudos do balanço de água na bacia Amazônica. Neste sentido, modelos numéricos globais e regionais apresentam-se como ferramentas úteis para análise das variabilidades e mudanças climáticas, uma vez que são capazes de representar as complexas interações entre o oceano, a atmosfera e a superfície terrestre (Richter e Xie 2008; Tozuka *et al.*, 2011; Chou *et al.*, 2014). Além disso, o uso dos modelos também pode ser utilizado na avaliação das características locais do clima, por meio do balanço de água (da Rocha

et al., 2009; Domingues, 2014; Rocha *et al.*, 2016; Sousa *et al.*, 2018; Caroletti *et al.*, 2019), suas variabilidades, assim como projeções do clima futuro decorrente das ações antrópicas (Goddard *et al.*, 2001; Rocha *et al.*, 2016).

Rocha *et al.* (2016), realizando simulações para o clima presente com o modelo regional Eta, forçado com o modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES, observaram que o modelo representa bem o ciclo sazonal da precipitação sobre a América do Sul, apesar de subestimar (superestima) a precipitação na Amazônia durante a estação chuvosa (seca). Richter e Xie (2008) avaliando o desempenho dos modelos globais do *Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)*, mostraram que os modelos tendem a subestimar a precipitação na região equatorial da América do Sul durante o período chuvoso, revelando as deficiências na representação dos processos convectivos sobre a região. Domingues (2014), utilizando o modelo de superfície (Simple Biosphere Model - SiB2-Reg) para avaliar os padrões médios anuais de balanço de água, encontraram valores de evapotranspiração na estação chuvosa, da ordem $3,4 \text{ mm dia}^{-1}$, para a bacia Amazônica. Moreira *et al.* (2019) avaliaram o balanço hídrico da América do Sul por meio de dados de precipitação do *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* e do *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP)* e também dados de evapotranspiração do *MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)* e do *Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)*. Mesmo utilizando um conjunto de dados gerados a partir de métodos de última geração, os autores observaram um não fechamento do balanço de água sobre o continente. Esses resultados mostram que a utilização de diferentes métodos pode conduzir a diferentes resultados no balanço de água. Com isso, fica evidente a necessidade de se avaliar o desempenho dos modelos climáticos, tanto para estudos sazonais de previsão climática quanto de mudanças climáticas (Nobre *et al.*, 2013).

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um estudo de modelagem numérica a fim de avaliar o desempenho do *Brazilian Global Atmospheric Model (BAM)*, na representação dos componentes do balanço de água na bacia Amazônica para o clima presente, referente ao período de 1979 a 2015.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Amazonas, formada por 4 sub-bacias principais: bacia do Rio Solimões, bacia do Rio Madeira, bacia do Rio Negro e bacia do Rio Purus. O rio Amazonas é o mais extenso do mundo com 6.400 mil km, desde sua nascente nos Andes peruanos até sua foz no Oceano Atlântico.

Apresenta descarga estimada entre $210.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $220.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, o que corresponde a $\sim 15\%$ da descarga total de água doce nos Oceanos (Marengo e Espinoza 2016). Os climas predominantes na bacia são: o equatorial quente e úmido (Tipo Af) e o clima de monção (Tipo Am) (Alvares *et al.*, 2014). As temperaturas médias anuais variam entre 26 e $28 \text{ }^\circ\text{C}$ na região Centro-equatorial, com amplitude térmica sazonal de $1-2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Marengo e Nobre 2009). A precipitação média anual é de 2.300 mm , com intensa variabilidade espacial e temporal sobre a bacia, influenciada por sistemas meteorológicos de diferentes escalas que interagem entre si.

2.2. Dados

Para avaliar o desempenho do BAM na representação dos componentes do balanço de água (precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, transporte e convergência de umidade), utilizou-se a reanálise do ERA-Interim (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF*) (Dee *et al.*, 2011) com resolução espacial de $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ de latitude-longitude. De acordo com Dee *et al.* (2011), é fato que a reanálise do ERA-Interim produz menos precipitação quando comparada as observações. Apesar disso, na última década a reanálise do ERA-Interim vem sendo utilizada nos mais diversos trabalhos, quer seja na avaliação da precipitação na França (Szczypta, *et al.*, 2011), na estimativa do balanço de água na Amazônia (Teixeira 2015), ou na estimativa de temperatura do solo na China (Yang e Zhang 2017). Os produtos de reanálises, de forma geral, apresentam limitações sistemáticas em suas descrições, inclusive na precipitação na América do Sul, com baixas correlações espaciais (Bosilovich *et al.*, 2008). Por outro lado, Simmons *et al.* (2010) mostraram a confiabilidade do uso da reanálise do ERA-Interim para campos próximos à superfície, comparando com observações de registros climáticos. Caroletti *et al.* (2019) indica o uso de reanálise do ERA-Interim como alternativa para avaliação de precipitação, em trabalhos compreendidos até 2017.

Esta reanálise é bastante utilizada para validação de modelos numéricos regionais (Teixeira 2015; Rocha *et al.*, 2016), como também globais (Figueroa *et al.*, 2016; Caroletti *et al.*, 2019). Por estes motivos, optou-se por utilizar a reanálise do Era-Interim, pois a mesma se adequa perfeitamente ao objetivo do trabalho, além do mais possui todas as variáveis e/ou componentes necessários para o cálculo do balanço de água em um único conjunto de dados.

2.3. Validação do modelo

Para o cálculo do transporte e convergência de umidade integrado na vertical utilizou-se a pressão ao nível médio do mar, as componentes zonal e meridional da velocidade do vento e a umidade específica nos níveis de $1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400$ e 300 hPa . A reanálise

do ERA-Interim foi interpolada para a resolução do modelo global BAM ($1.875^\circ \times 1.875^\circ$). Como o escoamento superficial não foi disponibilizado nesta simulação do modelo BAM, este foi calculado a partir da diferença entre os campos de precipitação e da evapotranspiração, semelhante ao realizado em outros estudos (Marengo, 2005; Teixeira, 2015; Rocha, 2016).

Para o cálculo da convergência do fluxo de umidade integrada na vertical (mm dia^{-1}) utilizou-se a Eq. (1):

$$C = -\nabla \cdot \mathbf{Q} \quad (1)$$

onde \mathbf{Q} é o fluxo de vapor d'água integrado verticalmente dado por:

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} qV dp \quad (2)$$

Na Eq. (2), g representa a aceleração da gravidade (m s^{-2}), q é a umidade específica (g kg^{-1}), qV o transporte horizontal de umidade ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), p_s a pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa) e p_t , a pressão em 300 hPa .

Foram avaliados a distribuição espacial, o ciclo sazonal e anual dos componentes do balanço de água na Amazônia simulados pelo BAM. As avaliações tiveram como base os campos médios sazonais para o período chuvoso (DJF) e seco (JJA) e para o ciclo anual sobre a bacia Amazônica e as porções norte e sul da bacia. As métricas estatísticas utilizadas para validação do BAM foram o viés (Eq. (3)), a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) (Eq. (4)) e o desvio padrão. Para a avaliação do desempenho do modelo utilizou-se o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2015, a fim de desconsiderar o período de *spin up* do modelo. Utilizou-se também a função de distribuição de probabilidade do tipo t de Student (Panofsky and Brieg 1968) para verificação da significância estatística ao nível de 95% .

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Psi_{modelo} - \Psi_{reanálise}) \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Psi_{modelo} - \Psi_{reanálise})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Nas Eqs. 3 e 4, Ψ_{modelo} representa os valores do modelo, $\Psi_{reanálise}$ os valores da reanálise e o N refere-se à quantidade de dados utilizados no estudo.

2.4. Descrição do modelo e estratégia de integração numérica

O *Brazilian Global Atmospheric Model (BAM)* do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), versão 1.0 (Figueroa *et al.*, 2016), é um modelo espectral semi-implícito hidrostático, baseado em uma formulação U-V, com coordenada vertical sigma, incor-

porando um esquema semi-lagrangiano para o transporte tridimensional de variáveis prognósticas de umidade, microfísica e traçador. O BAM possui resolução horizontal de $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ (lat/lon) e 28 níveis na vertical. As parametrizações físicas de superfície utilizadas pelo BAM incluem o modelo de vegetação dinâmica Integrated Biosphere Simulator - IBIS (Foley et al., 1996 e Kucharik et al., 2000), modificado por Kubota (2012). O IBIS é um modelo dinâmico de vegetação global, que representa um amplo conjunto de processos da superfície terrestre, fisiologia de dossel, fenologia de plantas, dinâmica e competição da vegetação (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000).

O mapa de vegetação utilizado nas simulações do BAM apresenta diferentes tipos de uso do solo, conforme mostrado na Fig. 1. A componente hidrológica do modelo IBIS apresenta oito camadas de solo com espessuras: 0.10, 0.15, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0 e 4.0 m. A profundidade do solo é de 12 metros - região onde acontece a extração de umidade pelas raízes. O modelo possui duas camadas de dossel. Os fluxos radiativos e turbulentos através das duas camadas da copa até a superfície são parametrizados. A taxa de absorção máxima de água no solo é limitada e dependente da umidade nas camadas de solo. A condutância estomática é parametrizada em função de concentração de CO_2 e da umidade relativa. O escoamento superficial ocorre quando a diferença entre a precipitação e a evaporação excede a taxa de infiltração máxima. As modificações implementadas por Kubota (2012) incluem expressões empíricas para o cálculo da resistência da transpiração do dossel em função do índice de área foliar (IAF), tipo de vegetação, e condições ambientais (radiação, umidade do solo, temperatura, umidade relativa).

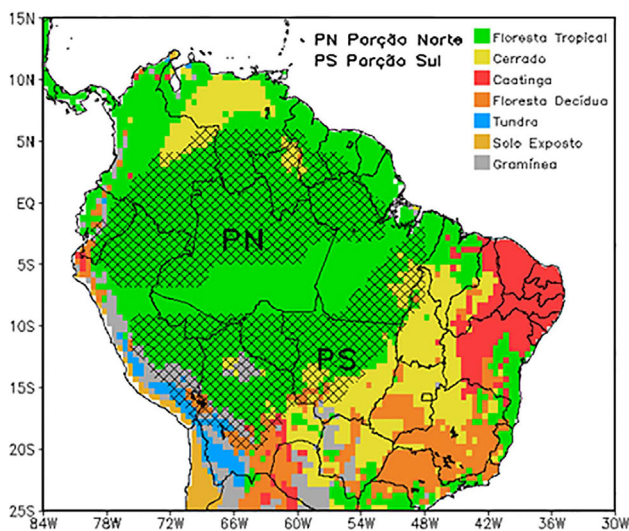


Figure 1 - Mapa de cobertura vegetal utilizado nas simulações do BAM apresentando os diferentes tipos de uso da terra. Também se destaca a “Porção Norte (PN)” e “Porção Sul (PS)” utilizadas no cálculo do balanço de água na bacia Amazônica.

O esquema de turbulência é de Mellor and Yamada (1982), o esquema de convecção rasa de Park e Bretherton (2009) e profunda de Grell-Dévényi (2002). Os esquemas de radiação de ondas curtas e longas de Iacono et al. (2008). Para avaliação dos componentes do balanço de água na bacia Amazônica realizou-se uma simulação numérica para o clima presente utilizando o BAM. A simulação consistiu em uma integração contínua de 37 anos para o período de 1979 à 2015, inicializada às 12Z (TMG - Tempo Médio de Greenwich) de 01 de janeiro de 1979. Durante a integração a concentração de dióxido de carbono (CO_2) foi mantida constante em 370 ppm. A condição de contorno oceânica foi obtida a partir da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (SST) v4* (Huang et al., 2015)]. Utilizou-se a condição inicial atmosférica do dia 1º de janeiro de 1979, obtida da reanálise do ERA-Interim (Dee et al., 2011).

3. Resultados e Discussão

3.1. Precipitação

A Fig. 2 apresenta a precipitação média sazonal simulada pelo BAM e a obtida a partir dos dados de reanálise do Era-Interim, ambas para os períodos chuvoso e seco. O BAM reproduziu o padrão espacial da precipitação sobre a bacia Amazônica em ambos períodos chuvoso e seco (Figs. 2a,e). Os maiores valores de precipitação sobre a bacia ocorrem no período chuvoso (Fig. 2b). A intensidade dos valores de precipitação, no período chuvoso, está relacionada ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre grande parte do Brasil, principalmente na bacia Amazônica (Marengo et al., 2012). Por outro lado, na porção central-norte da bacia Amazônica, o BAM simulou valores menos intensos de precipitação no período seco em relação aos valores da reanálise (Figs. 2e,f). Para DJF, o BAM subestimou a precipitação ($2-4 \text{ mm dia}^{-1}$) em pontos isolados da Amazônia. Porém superestima, principalmente sobre a Cordilheira dos Andes (Fig. 2c). De acordo com Silva et al. (2011) os conjuntos de dados de reanálise geralmente superestimam a quantidade de precipitação nas montanhas da América do Sul, quando comparados ao conjunto de dados do *Climate Prediction Center (CPC)*. A subestimativa da precipitação sobre a bacia Amazônica também é um padrão encontrado por outros modelos de circulação da atmosfera. Segundo Nobre et al. (2013), vários modelos globais, tais como: o *Brazilian Earth System Model Ocean-Atmosphere (BESM-OA, versão 2.3)*, o *Hadley Centre Coupled Model (HadCM3, versão 3.0)* e o *Canadian Coupled Global Climate Model (CanCM4, quarta geração)*, apresentam dificuldades em representar o padrão da precipitação, subestimando-a sobre a bacia, seme-

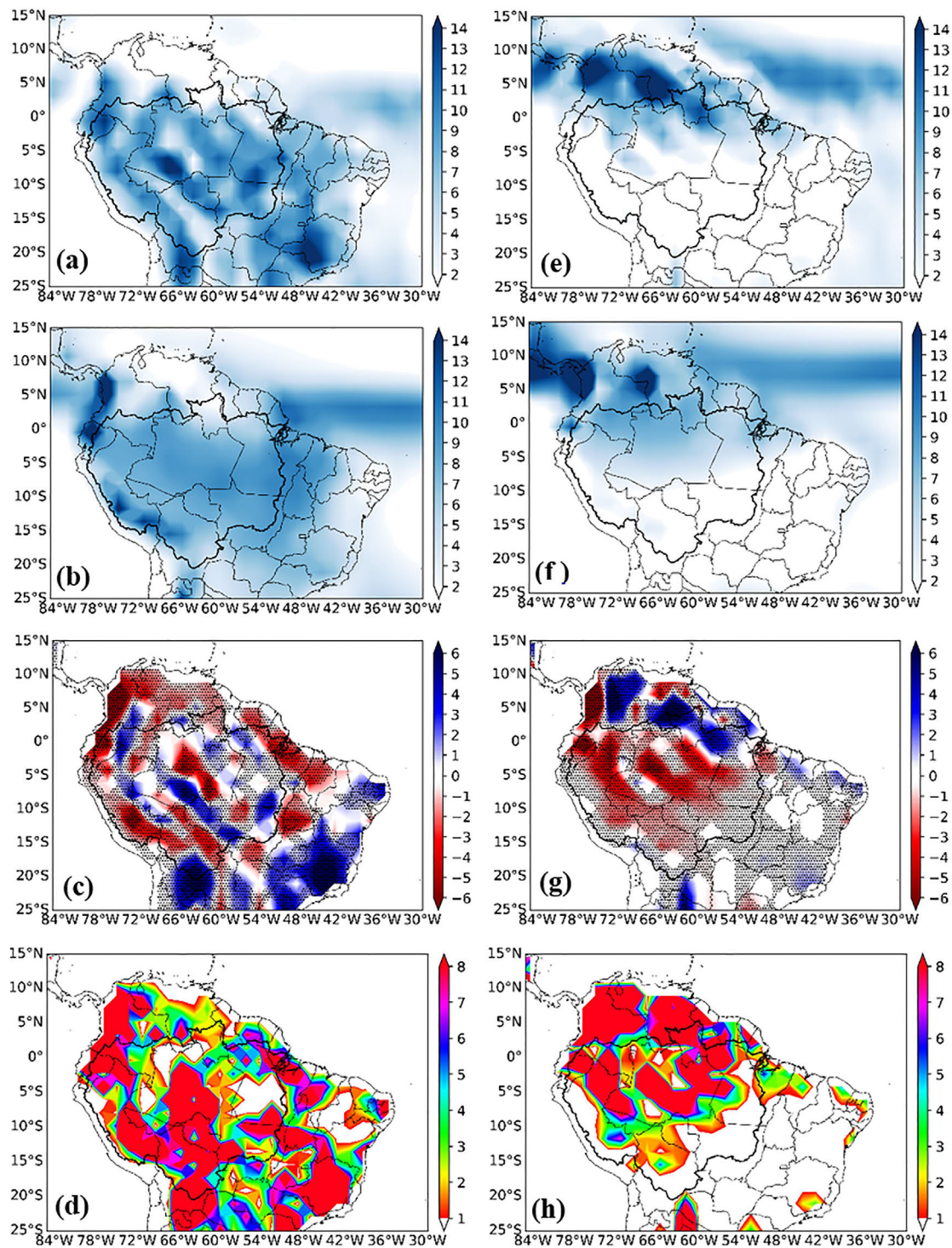


Figure 2 - Precipitação para o período chuvoso DJF (coluna esquerda) e seco JJA (coluna direita): (a,e) simulada pelo BAM; (b,f) Era-Interim; (c,g) viés e (d,h) RMSE. O limite da bacia Amazônica é representado pelo contorno (negrito). Áreas com diferenças significativas no nível de confiança de 95% são identificadas por pontos pretos. Unidades em mm dia^{-1} .

lhante ao observado na simulação com o modelo BAM. Richter e Xie (2008) afirmam que resoluções espaciais típicas de modelos globais, acima de 2° , apresentam difi-

culdades em capturar processos convectivos e, esse pode ser um dos motivos da simulação deficiente da precipitação na América do Sul equatorial. Tozuka *et al.* (2011),

avaliando o desempenho do modelo acoplado (oceano-atmosfera), mostraram que deficiências relacionadas a precipitação são maiores em regiões de convecção profunda, sendo esta uma das principais fontes de erro do modelo.

Para JJA, os maiores (menores) valores de precipitação provenientes da reanálise ocorrem na porção mais à norte (sul) da bacia devido à variação sazonal da ZCIT e às mudanças na circulação atmosférica regional sobre o continente. Neste período o BAM superestimou a precipitação (4-6 mm dia⁻¹) na porção norte e subestimou a precipitação (5-6 mm dia⁻¹) na parte central e oeste da bacia Amazônica (Fig. 2g). Erros superiores a 4 mm dia⁻¹ são observados, principalmente, no noroeste da bacia Amazônica e sobre a região Andina. Segundo Chou *et al.* (2014), esses erros podem ser provenientes dos esquemas de superfície (modelos de biosfera) acoplados aos modelos atmosféricos, provavelmente mal calibrados e ajustados para essa região devido à escassez de dados observados. Os esquemas de superfície, acoplados aos modelos climáticos, têm por finalidade representar os processos físicos, químicos e biológicos entre a superfície e atmosfera. Esses processos envolvem, entre outras coisas, as trocas de energia, massa e momentum entre esses meios. Com isso, esses esquemas realizam o particionamento de energia, fazendo com que parte da energia recebida seja particionada entre fluxo de calor sensível, latente e no solo. O fluxo de calor latente é responsável por transportar vapor d'água para a atmosfera, e desta forma, influenciar na formação de nuvens e precipitação. Se o esquema de superfície não particionar corretamente esses processos pode conduzir a erros nos balanços de energia, água e carbono, afetando o clima da região (Pitman (2003) e Mcguffie e Henderson-Sellers (2001)).

3.2. Evapotranspiração

A Fig. 3 apresenta a evapotranspiração média sazonal simulada pelo BAM e a obtida a partir da reanálise do Era-Interim para os períodos chuvoso e seco. De forma geral, apesar do BAM representar a variação sazonal da evapotranspiração sobre a bacia Amazônica, o modelo superestima na estação úmida e subestima na estação seca da região. Os valores de evapotranspiração simulado pelo BAM variaram entre 2 e 6 mm dia⁻¹ (Figs. 3a,e), estando inferiores aos da reanálise na porção sul (Figs. 3b,f). Semelhante a reanálise, o modelo BAM simulou maior variação sazonal na porção sul da bacia. Ademais, o BAM superestimou a evapotranspiração em DJF (Fig. 3c) e JJA (Fig. 3g) em torno de 1.5 mm dia⁻¹, principalmente na parte norte da bacia Amazônica. Esta superestimativa na evapotranspiração simulada na bacia pode estar associada a dificuldade do modelo em simular os processos convectivos, subestimando a precipitação, simulando maior quantidade de energia a superfície e, conseqüentemente, aumentando a evapotranspiração. Segundo Richter e Xie

(2008) apesar do alto grau de sofisticação das parametrizações de superfície, os modelos são diretamente dependentes do balanço de energia da superfície e, portanto, da quantidade de energia incidente.

No entanto, durante JJA o BAM subestimou a evapotranspiração (-1.5 mm dia⁻¹) na porção sul da bacia Amazônica (Fig. 3g). Isto pode estar relacionado à umidade do solo utilizada como condição inicial do BAM, ao armazenamento e as próprias parametrizações de superfície, que apesar dos avanços e esforços aplicados no modelo IBIS v2.6, ainda apresentam deficiências de ajuste para o bioma tropical da América do Sul (Kubota, 2012). De acordo com Verbeeck *et al.* (2011) para representar mais realisticamente a evapotranspiração da floresta Amazônica é necessário adequar as profundidades de raízes e solos utilizados. Os maiores valores de RMSE são observados no sudoeste da bacia para ambos períodos chuvoso e seco (Figs. 3d,h), com valores mais intensos no período seco da ordem de 4 mm dia⁻¹.

3.3. Transporte e convergência de umidade

As Figs. 4 e 5 apresentam o transporte e a convergência de umidade simulados pelo BAM e os obtidos a partir da reanálise do Era-Interim para os períodos chuvoso e seco, respectivamente. As características predominantes do transporte de umidade nas regiões tropical e subtropical configuram um regime de Monção na América do Sul (Grimm *et al.*, 2011), estabelecendo um padrão de intensa convergência de umidade e precipitação na Amazônia e no Brasil central durante o período chuvoso, conforme representado pela reanálise (Fig. 4b). Estas características também são observadas na simulação do transporte de umidade pelo BAM, conforme mostrado nas Figs. 4a,d. Um padrão importante da circulação equatorial, simulada pelo BAM para o período chuvoso, é a presença dos ventos alísios que transportam umidade do Atlântico Tropical para a Amazônia durante o verão (Fig. 4a). De acordo com Satyamurty *et al.* (2013), o fluxo de vapor d'água do Atlântico Equatorial é a principal fonte de umidade para a bacia Amazônica. Quando os ventos alísios encontram os Andes, estes são desviados para sul-sudeste e, a umidade é transportada da Amazônia para as regiões centro-sul do Brasil e norte da Argentina através dos Jatos de Baixos Níveis. Esse padrão na circulação é bem simulado pelo BAM no período chuvoso (Fig. 4a). No período chuvoso, o viés no transporte de umidade é da ordem de 105 kg m⁻¹ s⁻¹ principalmente na porção central-norte e leste da bacia Amazônica (Fig. 4c). Por outro lado, no período seco (Fig. 4f), o viés é mais intenso (150 kg m⁻¹ s⁻¹) e localizado no oeste da bacia.

A convergência de umidade representada na reanálise apresentou valores mais intensos sobre a bacia Amazônica durante o período chuvoso (Fig. 5b). O padrão de variação sazonal e espacial da convergência de umidade não foi bem simulado, pois no período chuvoso o BAM

apresentou valores mais altos no oeste e norte da bacia Amazônica em relação a reanálise (Fig. 5a). Nobre *et al.*

(2009) afirmaram que valores intensos de convergência de umidade sobre a bacia Amazônica e o Brasil Central são

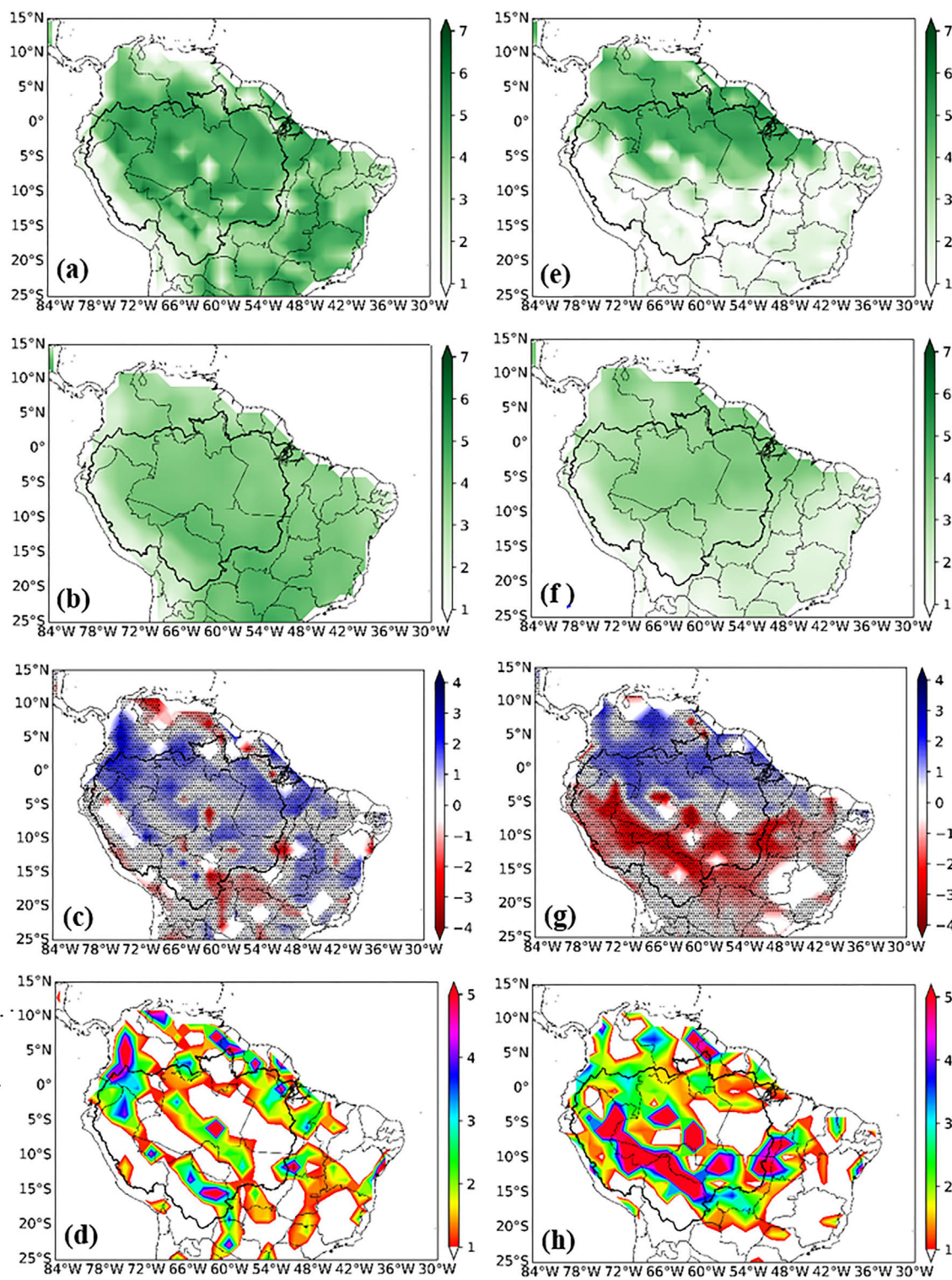


Figure 3 - Evapotranspiração para o período chuvoso DJF (coluna esquerda) e seco JJA (coluna direita): (a,e) simulada pelo BAM; (b,f) Era-Interim; (c, g) viés e (d,h) RMSE. O limite da bacia Amazônica é representado pelo contorno (negrito). Áreas com diferenças significativas no nível de confiança de 95% são identificadas por pontos pretos. Unidades em mm dia^{-1} .

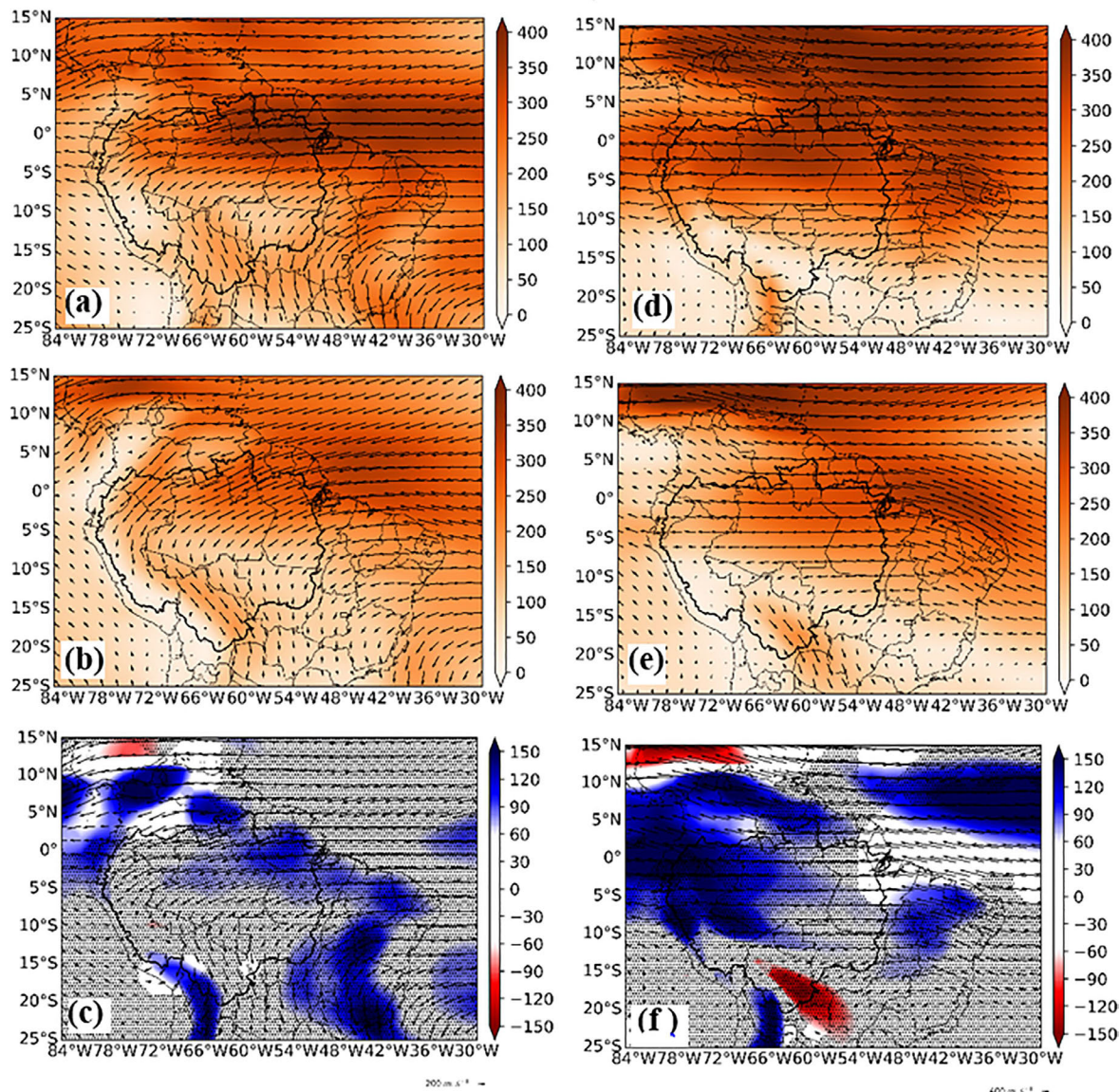


Figure 4 - Fluxo de vapor d'água integrado verticalmente para o período chuvoso DJF (coluna esquerda) e seco JJA (coluna direita): (a,d) simulado pelo BAM; (b,e) Era-Interim; (c,f) viés. O limite da bacia Amazônica é representado pelo contorno (negrito). Áreas com diferenças significativas no nível de confiança de 95% são identificadas por pontos pretos. Unidades em $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

esperados durante a Monção de Verão da América do Sul (MVAS). Para o período seco, o BAM simulou divergência de umidade na porção centro-norte da bacia (Fig. 5d). Este padrão não é observado na reanálise do Era-Interim (Fig. 5e). O BAM subestimou a convergência de umidade (5 mm dia^{-1}) em grande parte da bacia durante o período chuvoso (Fig. 5c). Por outro lado, subestimou a convergência de umidade na porção norte e superestimou na porção sul da bacia Amazônica no período seco (Fig. 5f). O modelo simulou um fluxo de vapor d'água menos intenso em relação a reanálise. A baixa resolução espacial de modelos globais, também pode ser responsável pelas dificuldades na representação dos processos convectivos (Richter e Xie, 2008).

3.4. Escoamento superficial

A Fig. 6 apresenta o escoamento superficial simulado pelo BAM e obtido a partir da reanálise do Era-Interim para média anual. Observa-se pequena variação espacial no escoamento superficial sobre a bacia Amazônica. A variação no escoamento superficial simulado pelo BAM é determinada principalmente pela precipitação, uma vez que, a magnitude da variação da evapotranspiração é bem menor. Os valores de escoamento superficial simulados variaram entre 2 a 6 mm dia^{-1} sobre a bacia Amazônica (Fig. 6a). Na média anual, valores positivos em toda a bacia mostram que a precipitação é sempre maior que a evapotranspiração. Esse comportamento tam-

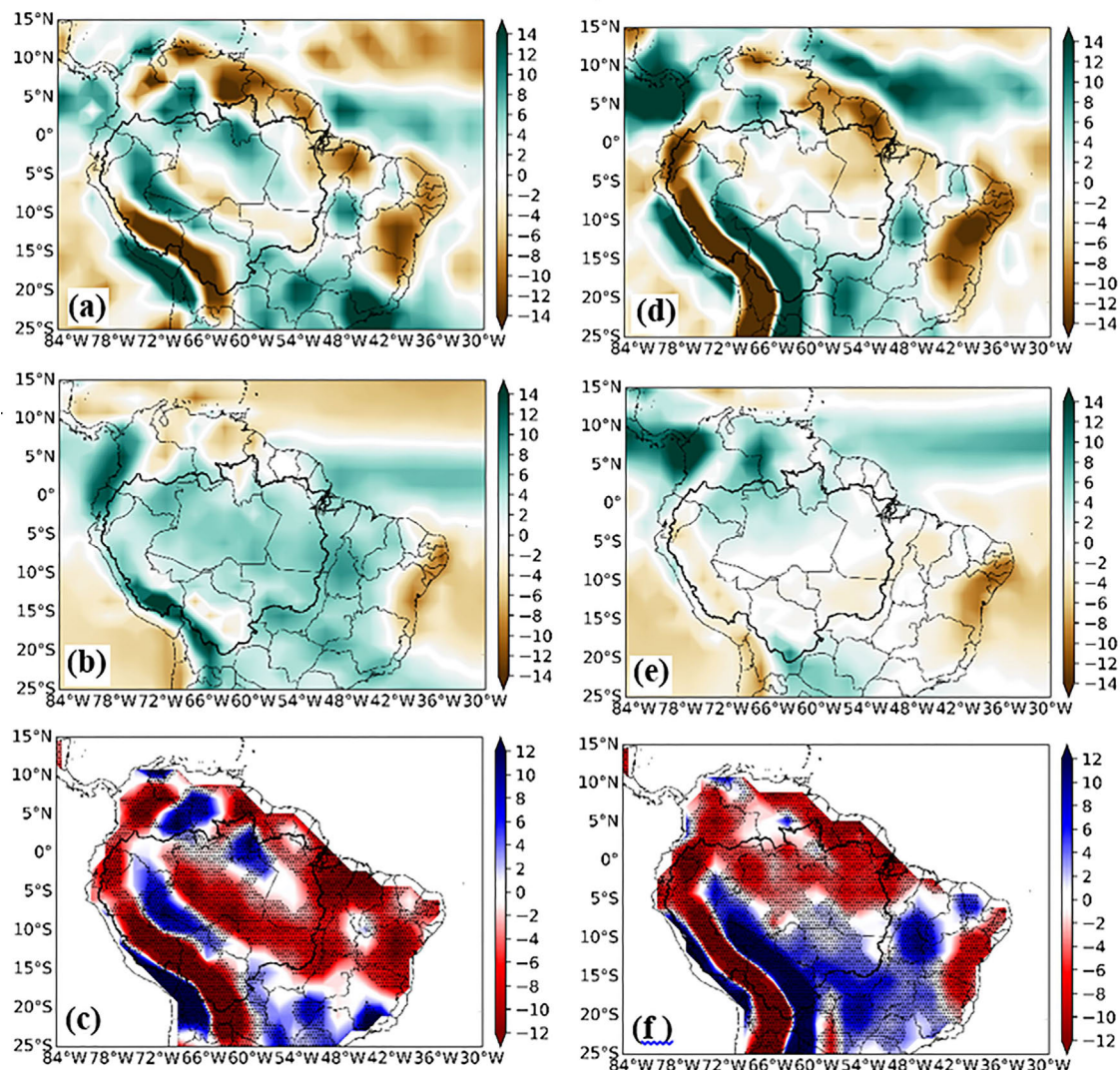


Figure 5 - Convergência de umidade para o período chuvoso DJF (coluna esquerda) e seco JJA (coluna direita): (a,d) simulado pelo BAM; (b,e) Era-Interim; (c,f) viés. O limite da bacia Amazônica é representado pelo contorno (negrito). Áreas com diferenças significativas no nível de confiança de 95% são identificadas por pontos pretos. Unidades em mm dia^{-1} .

bém é observado na reanálise, mostrando que o modelo BAM representa bem o escoamento superficial (Fig. 6b), apesar de apresentar regiões com vieses pronunciados no norte e sudoeste da bacia. Enquanto o modelo simula valores maiores de escoamento na porção norte da bacia e menores na porção sul, a reanálise mostra um padrão mais uniforme sobre toda a bacia.

3.5. Ciclo anual

Para efeito de análise do ciclo anual dos componentes do balanço de água, a bacia Amazônica foi dividida em duas porções: “Porção Norte” e “Porção Sul”, conforme mostrado na Fig. 1. O ciclo anual da precipitação, evapotranspiração e convergência de umidade simulados pelo BAM e estimados a partir da reanálise do Era-Interim é apresentado na Fig. 7. O ciclo anual dos componentes do

balanço de água simulado pelo BAM e pela reanálise mostram diferenças entre as porções norte e sul da bacia. Maior variação sazonal nos componentes do balanço de água é observada na porção sul da Amazônia. Estas diferenças devem-se às características do regime de monção na América do Sul e ao posicionamento da ZCAS (Rocha *et al.*, 2016). O BAM representou bem a sazonalidade da precipitação sobre a bacia e nas porções norte e sul, com valores próximos da reanálise e dentro do desvio padrão (Figs. 7a,d,g). Entretanto, o BAM subestimou a precipitação durante todo o ano, com exceção dos meses de novembro e dezembro (Fig. 7a).

O ciclo sazonal da evapotranspiração também é bem simulado pelo BAM (Fig. 7b), entretanto com uma defasagem nos picos máximos e mínimos durante o ciclo anual. Essa defasagem não é observada nas porções norte

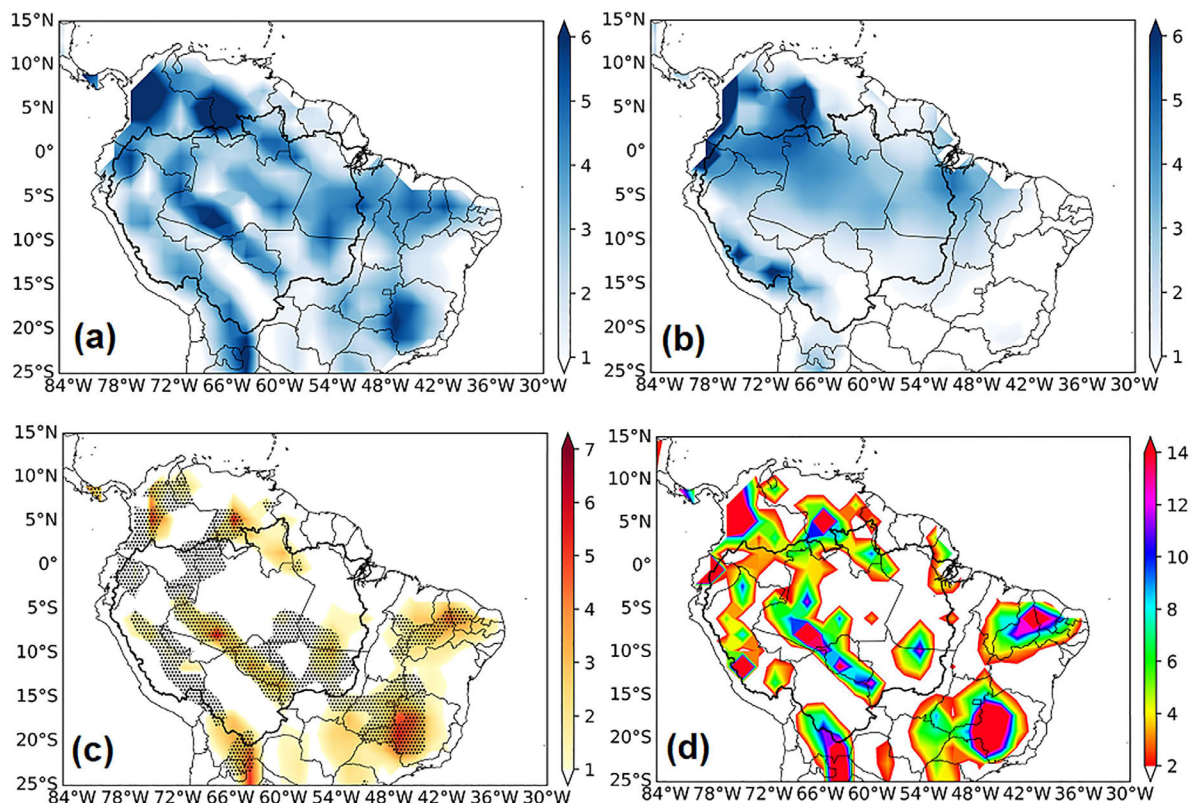


Figure 6 - Média anual do escoamento superficial: (a) simulado pelo BAM; (b) ERA-Interim; (c) viés e (d) RMSE. O limite da bacia Amazônica é representado pelo contorno (negrito). Áreas com diferenças significativas no nível de confiança de 95% são identificadas por pontos pretos. Unidades em mm dia^{-1} .

(Fig. 7e) e sul (Fig. 7h) da bacia. O BAM superestima a evapotranspiração na porção norte durante todo o ciclo anual e subestima na porção sul da bacia durante o período seco. Ressalta-se que, ao fazer a média para toda a bacia, o viés pode mascarar os valores sub e superestimados. O BAM não representou corretamente a variação sazonal da convergência de umidade sobre a bacia (Figs. 7c,f,i). O ciclo anual da convergência simulada não acompanha o padrão da reanálise. Na média da bacia, a convergência é subestimada durante todo o ano com viés negativo da ordem de 5 mm dia^{-1} . Na porção sul o BAM superestima a convergência de umidade na estação seca. Por outro lado, subestima em quase todo o ano (principalmente na estação chuvosa), simulando um padrão de divergência de umidade no período úmido (Fig. 7i).

3.6. Balanço de água

A Tabela 1 apresenta os componentes do balanço de água da bacia Amazônica simulados pelo BAM e obtidos pela reanálise do Era-Interim para a média anual. De forma geral, na simulação do BAM a bacia Amazônica comporta-se como sumidouro de umidade da atmosfera, uma vez que, os valores de precipitação são superiores aos de evapotranspiração (Tabela 1). Esse comportamento de

sumidouro foi encontrado também por Marengo (2005) quando avaliou os componentes do balanço água na Amazônia em condições neutras e em extremos de variabilidades climáticas como episódios de El Niño e La Niña.

A precipitação média anual simulada foi da ordem $5,7 \text{ mm dia}^{-1}$, apresentando um erro relativo de $-8,8\%$. A convergência de umidade foi de aproximadamente $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$, estando bem abaixo daquele observado pela reanálise. De forma geral, o BAM subestimou o escoamento superficial ($36,8\%$), mas apresentou bom desempenho na representação da evapotranspiração, superestimando da ordem de $5,3\%$. Apesar do BAM superestimar a evapotranspiração anual, os valores estão próximos daqueles encontrados por Domingues (2014). O alto viés no escoamento superficial é provavelmente decorrente dos erros encontrados na precipitação, uma vez que, a evapotranspiração apresentou baixo viés.

Comparando os componentes do balanço de água na atmosfera simulados pelo BAM, a convergência de umidade ($C = 0,9 \text{ mm dia}^{-1}$) não está em balanço com o escoamento superficial ($R = 1,9 \text{ mm dia}^{-1}$), pois existe diferença da ordem de $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$, que não é contabilizado. Esse desbalanço da ordem de $52,6\%$ mostra o não fechamento no ciclo da água na bacia Amazônica.

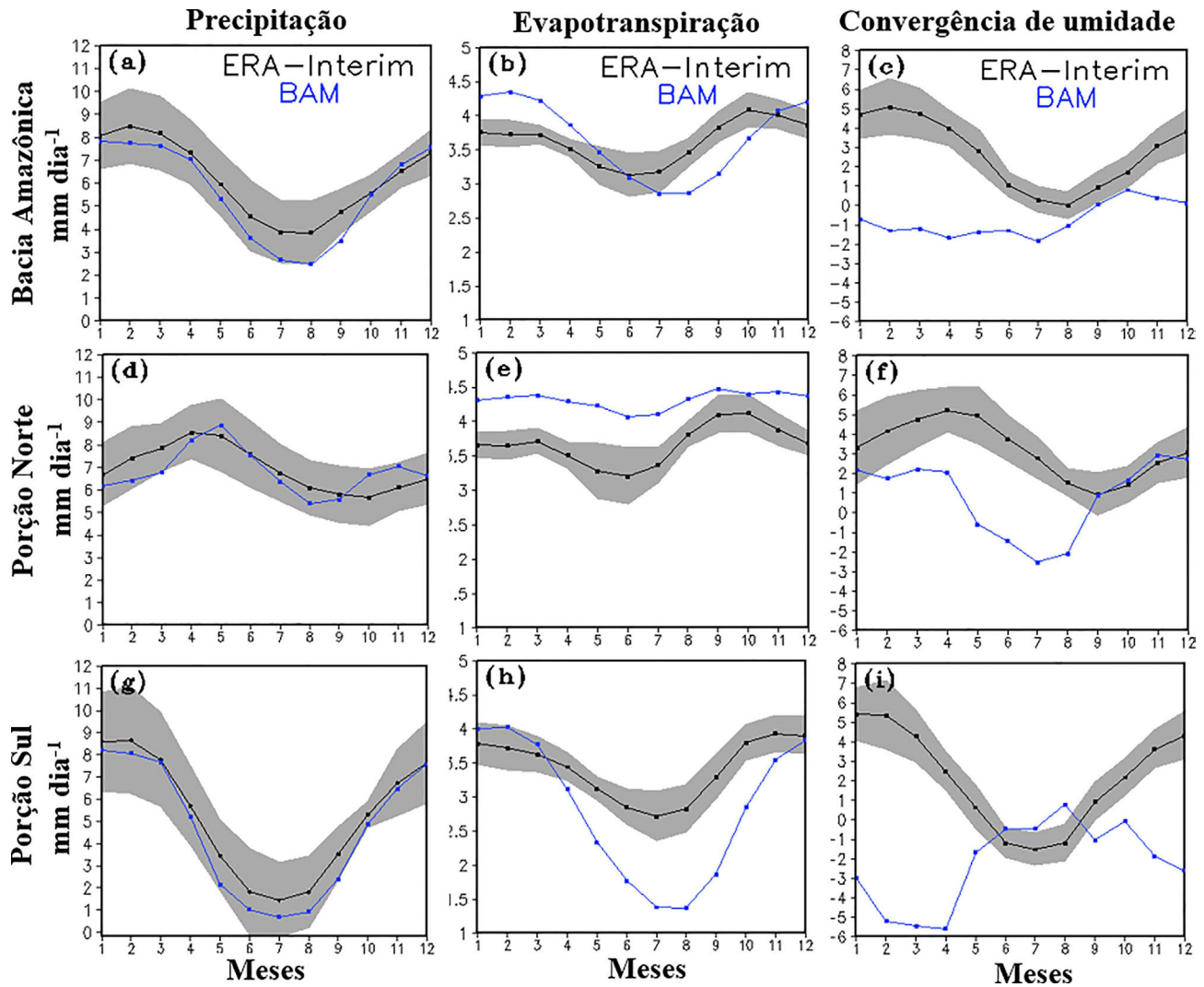


Figure 7 - Ciclo anual dos componentes do balanço de água (Precipitação, Evapotranspiração e Convergência de umidade) em ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$), simulado pelo BAM (linha azul) e da reanálise do Era-Interim (linha preta). A área em cinza representa o desvio padrão da reanálise: (a,b,c) para toda a Bacia Amazônica; (d,e,f) para Porção Norte da bacia e (g,h,i) para Porção Sul da bacia.

Tabela 1 - Média anual dos componentes do balanço de água na bacia Amazônica simulados pelo BAM e proveniente da reanálise do Era-Interim (período 1979 a 2015). Componentes ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$): precipitação (P), evapotranspiração (E), Escoamento Superficial (ES) e Convergência de umidade (C); P - E - C definido como “incremento de análise” que representa a medida absoluta do desbalanço e $[(C/ES) - 1]$ a medida relativa (%) do desbalanço.

Média anual dos componentes	BAM	Era-Interim	Erro do Modelo (%)
P	5.7	6.2	-8.8
E	3.8	3.6	5.3
ES	1.9	2.6	-36.8
C	0.9	2.7	
P - E	1.9	2.6	
P - E - C	1.0	-0.1	
Desbalanço = $[(C/ES) - 1]$ (%)	-52.6	3.8	

Segundo [Moreira \(2019\)](#) o não fechamento do balanço de água não invalida o estudo, apenas mostra algumas informações importantes sobre a dinâmica do ciclo do balanço hídrico da bacia, que estão relacionadas à escala e às con-

dições climáticas da bacia. Apesar da melhoria na representação da camada de solo, implementada no modelo IBIS v2.6, o erro encontrado na simulação da evapotranspiração provavelmente deve estar relacionado a deficiên-

cias do modelo de superfície em representar a difusão de calor e a condutividade de água no solo (Kubota, 2012). Como o escoamento foi calculado em função da diferença entre a precipitação e evapotranspiração, parte do desbalanço pode ser explicado pela forte redução do escoamento superficial. O desbalanço anual da reanálise foi da ordem de 3,8% apresentando um melhor fechamento em comparação aos períodos chuvoso (7,0%) e seco (-14,3%), não mostrado.

O BAM simulou as características climatológicas dos componentes do balanço de água na bacia Amazônica, apesar da dificuldade do BAM em posicionar corretamente os máximos de precipitação e convergência de umidade sobre a região Amazônica. O BAM superestimou os valores de evapotranspiração para o verão (11,6%) e subestimou (32%) no caso do inverno. O BAM apresentou valores menores de evapotranspiração para o período seco ($2,5 \text{ mm dia}^{-1}$) - mostrado. Entretanto, medidas de fluxo de calor latente obtidas em torres micrometeorológicas na Amazônia durante os experimentos ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observatory Study) (Gash e Nobre, 1997) e LBA (Gash *et al.*, 2004) mostraram que, apesar da redução da precipitação no período seco, a evapotranspiração apresenta pequeno aumento, mostrando que a floresta pode transpirar potencialmente mesmo em condições de deficiência hídrica (Hodnett *et al.*, 1996; Rocha *et al.*, 2004; von Randow *et al.*, 2004). Isso mostra que o esquema de superfície tem dificuldade em representar os processos hidrológicos no solo (absorção de água em camadas profundas) em condições de estresse hídrico. O comportamento de sumidouro de umidade na bacia foi bem capturado pelo BAM pois, na média, a precipitação foi consideravelmente maior que a evapotranspiração ($P > E$), em todos os períodos analisados. Na simulação do balanço de água obtida pelo BAM observou-se um desbalanço de 52,6%, com a convergência de umidade consideravelmente menor que o escoamento superficial ($C < ES$) sobre a bacia. Este desbalanço pode estar relacionado à limitação das parametrizações de convecção (precipitação) do BAM. Marengo *et al.* (2005) apresentaram um desbalanço da ordem de 51% em toda a bacia Amazônica, exibindo uma variabilidade interanual consistente com a variabilidade da precipitação. No entanto, os autores utilizaram para o cálculo do balanço a reanálise do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* e atribuíram este desbalanço a vários fatores incluindo: incertezas nas medidas de precipitação e observação dos rios e a não representação realística da reanálise sobre a bacia Amazônica. Por outro lado, embora parte dos erros nos componentes possam ser atribuídos às deficiências dos modelos em simular a convecção, uma representação errônea dos processos de superfície terrestre também é capaz contribuir para tais erros (Richter e Xie 2008).

4. Conclusões

Nesse estudo avaliou-se o desempenho do BAM na representação dos componentes do balanço de água na bacia Amazônica para o período de 1979 a 2015, utilizando a reanálise do Era-Interim (ECMWF). Os resultados mostram que o BAM consegue simular a variação sazonal e espacial da precipitação na Bacia Amazônica. O estabelecimento de uma circulação de monção na região tropical com intensa convergência de umidade e precipitação na Amazônia mostra a capacidade do BAM em capturar as principais características do clima no continente sul-americano. Entretanto, o BAM apresenta um ciclo hidrológico menos intenso na bacia com valores mais reduzidos na precipitação, na convergência de umidade e no escoamento superficial. O não fechamento do balanço de água mostra uma limitação do BAM em simular corretamente o processo principalmente de convergência de umidade, conduzindo, desta forma, a um ciclo hidrológico mais enfraquecido sobre a bacia. Além disso, o BAM necessita de ajustes e calibração na representação de processos de superfície, como por exemplo de evapotranspiração, uma vez que o BAM apresenta dificuldade na simulação da variação sazonal desta variável na bacia Amazônia. Esta dificuldade provavelmente tem relação tanto com a umidade do solo utilizada na condição inicial do modelo, como também a pequena quantidade de camadas de solo do mesmo. De maneira geral, apesar das dificuldades encontradas pelas simulações do BAM, os erros sistemáticos obtidos nos componentes do balanço de água são de grande importância para determinação do grau de confiança para simulações do clima presente, em estudos de variabilidades no clima e de projeções futuras utilizando cenários de emissões antrópicas.

Agradecimentos

Este artigo é parte da Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) / Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Os autores agradecem ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) por disponibilizar o Supercomputador TUPÃ para realização das integrações numéricas, o Laboratório de Modelagem do Sistema Climático Terrestre (LABCLIM) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) por disponibilizar a estrutura física computacional - Cluster Tambaqui. O primeiro autor agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Referências

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- AVISSAR, R.; NOBRE, C. Preface to special issue on the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). In: *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8034, 2002.
- BOSILOVICH, M.G.; CHEN, J.; ROBERTSON, F.R.; & ADLER, R.F. Evaluation of global precipitation in reanalyses. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 47, n. 9, p. 2279-2299, 2008.
- CAROLETTI, G.N.; COSCARELLI, R.; CALOIERO, T. Validation of satellite, reanalysis and rcm data of monthly rainfall in Calabria (Southern Italy) *Remote Sensing*, v. 11, n. 13, p. 1625, 2019.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, 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, n. 5, p. 438-454, 2014.
- da ROCHA, H.R.; MANZI, A.O.; CABRAL, O.M.; MILLER, S.D.; GOULDEN, M.L.; SALESKA, S.R.; COUPE, N.R.; WOFSY, S.C.; BORMA, L.S.; ARTAXO, P.; VOURLITIS, G.; NOGUEIRA, J.S.; CARDOSO, F.L.; NOBRE, A.D.; KRUIJT, B.; FREITAS, H.C.; von RANDOW, C.; AGUIAR, R.G.; MAIA, J.F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, n. G00B12, p. 1-8, 2009.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M.A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A.C.M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A.J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.B.; HERSBACH, H.; HÖLM, E.V.; ISAKSEN, I.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A.P.; MONGE-SANZ, B.M.; MORCRETTE, J.-J.; PARK, B.-K.; PEUBEY, C.; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.-N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- DOMINGUES, L.M. **O Balanço de Água Superficial no Brasil Calculado com o Modelo Sib2-Regional: Padrões Médios e Sensibilidade aos Eventos de Aquecimento e Seca.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- FIGUEROA, S.; BONATTI, J.; KUBOTA, P.; GRELL, G.; MORRISON, H.; BARROS, S.; FERNANDEZ, J.; RAMIREZ, E.; SIQUEIRA, L.; LUZIA, G.; SILVA, J.; SILVA, J.; PENDHARKAR, J.; CAPISTRANO, V.; ALVIM, D.; ENORÉ, D.; DINIZ, F.; SATYAMURTY, P.; CAVALCANTI, I.; NOBRE, P.; BARBOSA, H.; MENDEZ, C.; PANNETTA, J. The Brazilian global atmospheric model performance for Tropical Rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. *Weather and Forecasting*, v. 31, p. 1547-1572, 2016.
- FOLEY, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, p. 603-628, 1996.
- GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A. Climatic effects of Amazonian deforestation: Some results from ABRACOS. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 5, p. 823-830, 1997.
- GASH, J.H.C.; HUNTINGFORD, C.; MARENGO, J.A.; BETTS, R.A.; COX, P.M.; FISCH, G.; FU, R.; GANDU, A.W.; HARRIS, P.P.; MACHADO, L.A.T.; von RANDOW, C.; SILVA DIAS, M.A.F. Amazonian climate: results and future research. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, n. 1-3, p. 187-193, 2004.
- GODDARD, L.; MASON, S.J.; ZEBIAK, S. E.; ROPELEWSKI, C.F.; BASHER, R.; CANE, M.A. Current approaches to seasonal to interannual climate predictions. *International Journal of Climatology*, v. 21, n. 9, p. 1111-1152, 2001.
- GRACE, J.; MALHI, Y.; LLOYD, J. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. In: *Global Change Biology*, v. 2, n. 3, p. 209-217, 1996.
- GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 14, 38-1-38-4, 2002.
- GRIMM, A.M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 25, n. 4, p. 537-554, 2011.
- HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; MARQUES FILHO, A.O. Deep soil water uptake by forest and pasture in central Amazonia: predictions from long-term daily rainfall using a simple water balance model. In: *Amazonian Deforestation and Climate*, Gash, J.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M.; Victoria, R.L. (eds) Chichester: John Wiley, p. 79-99, 1996.
- HUANG, B.; BANZON, V.F.; FREEMAN, E.; LAWRIE, J.; LIU, W.; PETERSON, T.C.; SMITH, T.M.; THORNE, P.W.; WOODRUFF, S.D.; ZHANG, H.-M. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 4. Part I: Upgrades and Intercomparisons, *Journal of Climate*, v. 28, p. 911-930, 2015.
- IACONO, M.; DELAMERE, J.; MLAWER, E.; SHEPHARD, M.; CLOUGH, S.; COLLINS, W. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. 13, 2008.
- KUBOTA, P.Y. **Variability of Storage Energy in the Soil-Canopy System and its Impact on the Definition of Precipitation Standard in South America.** Tese de doutorado em Ciências Atmosféricas. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012, 285p.

- KUCHARIK, C.J.; FOLEY, J.A.; DELIRE, C.; VERONICA, F.A.; COE, M.T.; LENTERS, J.D.; YOUNG-MOLLING, C.; RAMANKUTTY, N.; NORMAN, J.M.; GOWER, S.T. Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure, **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 3, p. 795-825, 2000.
- 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.; ESPINOZA, J.C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.
- MARENGO, J.A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. **Climate Dynamics**, v. 24, n. 1, p. 11-22, 2005.
- MARENGO, J.A. On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: a historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 1-19, 2006.
- MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Clima da Região Amazônica. In: Eds I. Cavalcanti, N. Ferreira, M. A. Silva Dias, M. A. Justi. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 13, p. 198-212, 2009.
- MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; SOARES, W.R.; ALVES, L.M.; NOBRE, C.A. Extreme climatic events in the Amazon basin climatological and hydrological context of recent floods. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 1-2, p. 73-85, 2012.
- MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLERS, A. Forty Years of Numerical Climate Modeling. **International Journal of Climatology**, v. 21, p. 1067–1109, 2001.
- MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of geophysics and space physics**, v. 20, p. 851–875, 1982.
- 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.
- MOREIRA, A.A.; RUHOFF, A.L.; ROBERTI, D.R.; SOUZA, V.A.; da ROCHA, H.R.; PAIVA, R.C.D. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. **Journal of Hydrology** v. 575, p. 131–147, 2019.
- NASCIMENTO, M.G.; HERDIES, D.L.; SOUZA, D.O. The south american water balance: The influence of low-level jets. **Journal of Climate**, v. 29, n. 4, p. 1429-1449, 2016.
- 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, v. 186, p. 149–162, 2009.
- NOBRE, P.; SIQUEIRA, L.S.P.; DE ALMEIDA, R.A.F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÁ O.G.P.; BOTTINO, M.J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S.N.; COSTA, M.C.; BAPTISTA, M.; IRBER, L.; MARCONDES, G.G. Climate simulation and change in the brazilian climate model, **Journal of Climate**, v.26, p. 6716-6732, 2013.
- PANOFSKY, H.A.; BRIERG, W. Some applications of statistics to meteorology. 1. ed. Florida: **University Park**, 1968. 224 p.
- PARK, S.; BRETHERTON, C.S. The university of washington shallow convection and moist turbulence schemes and their impact on climate simulations with the community atmosphere model. **Journal of Climate**, v. 22, n. 12, p. 3449-3469, 2009.
- PHILLIPS, O.; BAKER, T; LEWIS, S.; CHAO, K.; HIGUCHI, N. The changing Amazon forest. **Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences**, v. 363, p. 1819–1827, 2008.
- PITIMAN, A.J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. **International Journal of Climatology**, v. 23, p. 479–510, 2003.
- RAO, V.B. Annual variations of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. 26, p. 539-551, 1996.
- RICHTER, I.; XIE, S.P. On the origin of equatorial Atlantic biases in coupled general circulation models. **Climate Dynamics**, v. 31, p. 587–598, 2008.
- ROCHA, H.R.; GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D.; MENTON, M.C.; PINTO, L.D.V.O.; FREITAS, H.B.; SILVA FIGUEIRA, A.M. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. In: **Ecological Applications**, v. 14, p. 822–832, 2004.
- ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; SATYAMURTY, P.; DE FREITAS, S.R.; MOREIRA, D.S.; DA 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. 19, p. 91–112, 2016.
- ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.S.; SILVA, P.R.T.D.; GOMES, W.B.; VERGASTA, L.A.; MOURA, R.G.; SILVA, J.J.S.D. Precipitation recycling in the amazon basin: the role of moisture transport and surface evapotranspiration. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 387-398, 2017.
- ROCHA, V.M. **Reciclagem de Precipitação na Amazônia: Clima Presente e Cenários Futuros**. Tese de Doutorado em Ciências Ambientais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2016.
- SALATI, E.; DALL'OLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J.R. Recycling of water in the amazon basin: an isotopic study. **Water Resour Research**, v. 15, n. 5, p. 1250-1258, 1979.
- SALATI, E.; MARQUES, J. Climatology of the Amazon region. In: Sioli, H. (ed). **The Amazon, Limnology and Landscape Ecology of a Mighty Topical River and its Basin**. Dordrecht: W. Junk, p. 85-126, 1984.
- 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.
- SILVA, V.B.S.; KOUSKY, V.E.; HIGGINS, R.W. Daily precipitation statistics for south america: an intercomparison between ncep reanalyses and observations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 12, n. 1, p. 101-117, 2011.
- TEIXEIRA, L.G.S. **Impactos das Mudanças no Uso da Terra na Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: Um Estudo de Modelagem Numérica**. Dissertação de Mestrado em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 119 p, 2015.

- SIMMONS, A.J.; WILLETT, K.M.; JONES, P.D.; THORNE, P. W.; DEE, D.P. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, D01110, 2010.
- SOUSA, A.C., CANDIDO, L.A.; ANDREOLI, R.V. Variabilidade interanual da precipitação e fluxo de umidade sobre a Amazônia usando o QTCM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 41-56, 2018.
- SZCZYPTA, C.; CALVET, J.-C.; ALBERGEL, C.; BALSAMO, G.; BOUSSETTA, S.; CARRER, D.; LAFONT, S.; MEUREY, C. Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France, **Hydrology and Earth System Science**, v. 15, p. 647–666, 2011.
- TOZUKA, T.; DOI, T.; MIYASAKA, T.; KEENLYSIDE, N.; YAMAGATA, T. Key factors in simulating the equatorial atlantic zonal sst gradient in a coupled GCM. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, C06010, 2011.
- TRENBERTH, K.E. Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. **Journal of Climate**, v. 12, n. 5, p. 1368-1381, 1999.
- VERBEECK, H.; PEYLIN, P.; BACOUR, C.; BONAL, D.; STEPPE, K.; CIAIS, P. Seasonal patterns of CO₂ fluxes in Amazon forests: Fusion of eddy covariance data and the ORCHIDEE model, **Journal of Geophysical Research**, v. 116, G02018, 2011.
- von RANDOW, C.; MANZI, A.O.; KRUIJT, B.; DE OLIVEIRA, P.J.; ZANCHI, F.B.; SILVA, R. L.; CARDOSO, F.L. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 5-26, 2004.
- YANG, K.; ZHANG, J. Evaluation of reanalysis datasets against observational soil temperature data over China. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 5, p. 317-337, 2017.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.