

# A água da Amazônia irriga o Sudeste do Brasil? Uma visão climatológica

*Does the Amazonian water irrigate the Southeastern region of Brazil? A climatological view*

*Vinícius Machado Rocha<sup>1</sup>*

**RESUMO:** Este artigo traz uma perspectiva histórica da evolução do conhecimento sobre a reciclagem de precipitação e fornece uma visão crítica do estado da arte atual. São retratadas as principais fontes de umidade para a precipitação na Amazônia, assim como a circulação atmosférica e o transporte de vapor d'água sobre a América do Sul.

**ABSTRACT:** This paper constitutes a historical perspective in the evolution of the knowledge on precipitation recycling and provides a critical view on the current state-of-the-art. The main sources of moisture for Amazon rainfall, atmospheric circulation and the transport of water vapor over South America are described.

**PALAVRAS-CHAVE:** Amazônia. Reciclagem de Precipitação. Transporte de vapor d'água.

**KEYWORDS:** Amazonia. Precipitation Recycling. Transport of water vapor.

## I. INTRODUÇÃO

A Amazônia é a única grande extensão contínua de floresta tropical úmida do mundo. Com uma área de aproximadamente 6,5 milhões de km<sup>2</sup>, que corresponde a 56% das florestas tropicais da Terra, a Amazônia 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 absorção do excesso de carbono da atmosfera, o transporte de gases traço, aerossóis e vapor d'água para regiões remotas e, principalmente, a reciclagem de precipitação. A floresta amazônica também atua como uma das fontes indispensáveis de calor para a atmosfera global por meio de sua intensa evapotranspiração e liberação de calor latente de condensação na média e alta troposfera em nuvens convectivas tropicais,

---

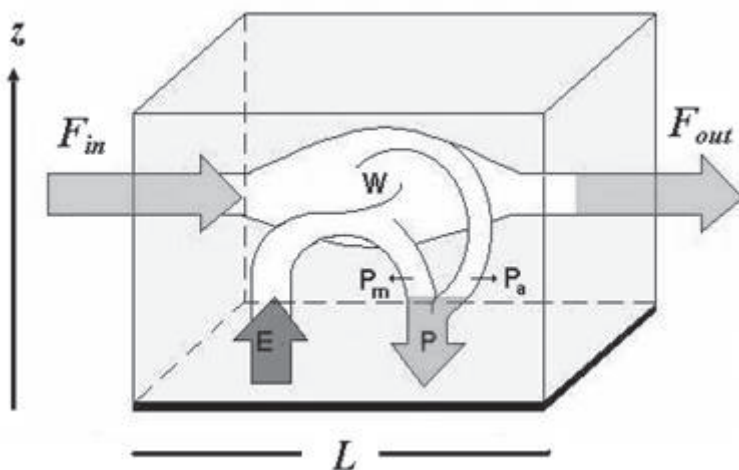
<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). E-mail: [vinicius@inpa.gov.br](mailto:vinicius@inpa.gov.br)

contribuindo na geração e manutenção da circulação atmosférica em escalas regional e global (FISCH *et al.*, 1998; ARTAXO *et al.*, 2005; FEARNSSIDE, 2005; MARENGO, 2006; NOBRE *et al.*, 2009a,b).

No que se refere ao balanço de água, a bacia amazônica comporta-se como um sumidouro de umidade da atmosfera (precipitação maior que evapotranspiração), recebendo vapor d'água tanto do transporte de origem oceânica quanto da evapotranspiração produzida pela própria floresta tropical. Com relação à circulação regional, a Amazônia representa uma importante fonte de umidade para o Centro, Sudeste e Sul do Brasil, assim como para o norte da Argentina, incluindo a bacia do Prata, contribuindo para a ocorrência de precipitação nessas regiões (MARENGO *et al.* 2004, MARENGO, 2004, 2005 e 2006; VERA *et al.*, 2006; SATYAMURTY *et al.*, 2013). Nesse sentido, Arraut e Satyamurty (2009) mostraram que a atividade convectiva sobre o sul do Brasil e norte da Argentina é influenciada pelo transporte de umidade através da fronteira sul da bacia amazônica, feito pelos Jatos de Baixos Níveis (JBNS) a leste dos Andes.

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, na precipitação total sobre uma região (Figura 1). 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).

**Figura 1. Modelo conceitual de reciclagem de precipitação**



Fonte: Adaptado de Brubaker et al. (1993).

Como visto na imagem na Figura 1, os termos  $P_m$  e  $P_a$  referem-

-se às taxas de precipitação provenientes da evapotranspiração e do vapor d'água advectados para a região, respectivamente;  $F_{in}$  e  $F_{out}$  são os fluxos de vapor d'água que entra e sai da região considerada, respectivamente;  $E$  é a taxa de evapotranspiração e  $W$  é o armazenamento de água na atmosfera (água precipitável).

Com base na interpretação de dados observacionais, reanálises e modelos numéricos de diferentes centros meteorológicos, diversos estudos foram conduzidos por 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, com o objetivo de quantificar e descrever a distribuição da reciclagem de precipitação na Amazônia. Os resultados desses estudos, apesar de apresentarem diferenças quantitativas, mostram que a quantificação do 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.

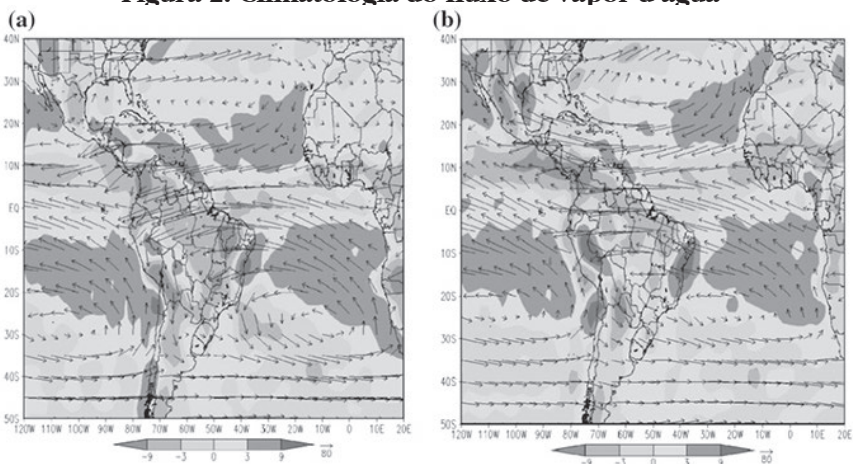
Este artigo traz uma perspectiva histórica da evolução do conhecimento sobre a reciclagem de precipitação e fornece uma visão crítica do estado da arte atual. São retratadas as características do clima da Amazônia no que concerne às principais fontes de umidade para a precipitação regional, assim como a circulação atmosférica e o transporte de vapor d'água sobre o continente sul americano. Apresenta uma revisão dos estudos observacionais e de modelagem numérica com o objetivo de quantificar e avaliar a reciclagem de precipitação na Amazônia e em outras regiões do planeta.

## **2. CARACTERÍSTICAS DO CLIMA DA AMAZÔNIA**

Na Amazônia, a precipitação apresenta significativa variabilidade espaço-temporal determinada pela influência de diferentes sistemas de escala local, mesoescala, escala sinótica e de grande escala, que atuam na região (MARENGO e NOBRE, 2009; NOBRE *et al.*, 2009b). A precipitação média anual é de aproximadamente 2.300 mm, apresentando três núcleos com precipitação abundante. Um deles está localizado no noroeste da Amazônia, com chuvas acima de 3.500 mm ano<sup>-1</sup>, estando associado à condensação do ar úmido trazido pelos ventos de leste da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que sofrem levantamento orográfico sobre os Andes (FIGUEROA e NOBRE, 1990). O alto índice pluviométrico sobre o noroeste da bacia pode ser entendido como a resposta da flutuação dinâmica do centro de convecção quase permanente em combinação com a grande quantidade de evapotranspiração local que, por sua vez, contribui para a reciclagem da precipitação (NOBRE *et al.*, 2009b). A segunda máxima de precipitação, localizada sobre a foz do Rio Amazonas, está associada à ZCIT e circulações locais relacionadas às linhas de instabilidade que surgem ao longo da costa, principalmente ao final do período vespertino, forçadas

pela circulação de brisa marinha (COHEN *et al.*, 1995). O terceiro centro localiza-se na parte sul da região amazônica, sobretudo durante os meses de janeiro/fevereiro/março (verão austral), sendo influenciado pela presença constante de aglomerados convectivos associados a sistemas frontais sob a área de influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A maior parte da América do Sul tropical e subtropical recebe mais de 50% do seu total anual de precipitação no verão austral (NOBRE *et al.*, 2009b; SATYAMURTY *et al.*, 2013) sob a forma de precipitação convectiva com forte variação diurna.

**Figura 2. Climatologia do fluxo de vapor d'água**



Fonte: Satyamurty et al. (2013).

A imagem na Figura 2 indica o fluxo de vapor d'água integrado verticalmente (vetores,  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) e sua divergência (cor sombreada,  $10^{-5} \times \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) no período de 1978-2010 (dados de reanálises do National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research – NCEP/NCAR). Estação chuvosa – DJF (a) e seca – JJA (b).

A circulação atmosférica durante o verão apresenta uma baixa térmica persistente entre  $20^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ S sobre a região do Chaco, associada à máxima nebulosidade sobre a Amazônia Central e o Antiplano da Bolívia, na época em que a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é mais ativa e intensa. Um padrão importante da circulação equatorial são os ventos alísios, que transportam umidade do Oceano Atlântico Tropical para a Amazônia, associados à maior pressão atmosférica no Atlântico Tropical Norte durante o verão e outono. Esse fluxo de vapor d'água do Atlântico Equatorial é a principal fonte de umidade para a bacia amazônica (SATYAMURTY *et al.*, 2013). Quando os ventos alísios encontram os Andes, então, o fluxo de vapor d'água é desviado para o sudeste, e a umidade é, por sua

vez, transportada da Amazônia para o centro-sul do Brasil, para a bacia do Prata e o norte da Argentina. Nesse período, a intensa atividade convectiva e as chuvas sobre as regiões sul e oeste da Amazônia estão associadas às frentes frias que vêm do sul, assim como ao intenso fluxo de umidade da Amazônia para as latitudes maiores da América do Sul, através do JBN canalizado a leste dos Andes. As características da circulação atmosférica observadas sobre a América do Sul tropical e subtropical durante o verão austral, Figura 2a, configuram o regime de Monção de Verão da América do Sul – MVAS (ARRAUT e SATYAMURTY, 2009; NOBRE *et al.*, 2009b). Entre o mês de novembro e final de fevereiro, o regime de monção está em sua fase madura, por outro lado, a fase de decaimento se estabelece entre março e maio, isto é, a convecção vai progredindo em direção ao norte. Nesta fase, a precipitação se intensifica sobre a seção norte da Amazônia e Nordeste do Brasil. A climatologia sazonal da circulação em baixos níveis mostra que, durante o inverno, Figura 2b, há uma convergência dos ventos alísios de sudeste e nordeste, formando um fluxo em direção à América Central, conduzindo umidade não apenas para esta região, mas também para o leste do Nordeste do Brasil e noroeste da América do Sul, o que se reflete nas precipitações sobre estas áreas (SATYAMURTY *et al.*, 2013).

### **3. FONTES DE UMIDADE PARA A BACIA AMAZÔNICA E O TRANSPORTE DE VAPOR D'ÁGUA SOBRE O CONTINENTE SUL AMERICANO**

Avaliando o transporte de vapor d'água na Amazônia utilizando dados de reanálises do National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research – NCEP/NCAR, Satyamurty *et al.* (2013) mostraram que: (i) as fontes de umidade para a bacia amazônica estão localizadas no Oceano Atlântico Tropical Norte e Sul; e (ii) o transporte de umidade que alimenta a bacia ocorre de leste para oeste durante todas as estações do ano.

Drumond *et al.* (2014) utilizaram um modelo Lagrangiano (FLEX-PART) e as reanálises ERA-Interim no período de 1979-2012 para investigar o papel da umidade da bacia amazônica no balanço hidrológico regional ao longo do ano. Os resultados indicam que o Atlântico Tropical é a principal fonte de umidade para a Amazônia. O Atlântico Tropical Norte contribui principalmente durante o verão austral, enquanto a contribuição do Atlântico Tropical Sul prevalece no restante do ano. Durante eventos de El Niño, a contribuição do Atlântico Norte aumenta superficialmente entre junho-janeiro, ao passo que a contribuição do Atlântico Sul é maior no outono do ano seguinte.

Drumond *et al.* (2008) investigaram as principais fontes de umidade para o Brasil Central e a bacia do Prata, num período médio de 5 anos (2000-2004), utilizando um método Lagrangiano que identifica as contribuições de umidade no balanço de água de uma região. Os resultados

revelam a importância do Atlântico Tropical Sul como fonte de umidade para o Brasil Central, assim como da reciclagem de precipitação para a bacia do Prata, sobretudo durante o verão austral. Ademais, o Atlântico Tropical Norte é também considerado uma fonte adicional de umidade para ambas as regiões. Doyle e Barros (2002) verificaram que a circulação associada à parte oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul transporta vapor d'água do Oceano Atlântico Sul para a América do Sul Subtropical.

O papel climatológico do Oceano Atlântico Norte Subtropical como fonte de umidade para a Amazônia foi discutido por Gimeno *et al.* (2012 e 2013), que avaliaram a influência das regiões oceânicas na precipitação continental. De acordo com os autores, o Oceano Atlântico Norte Subtropical fornece umidade para a precipitação em uma grande área continental, que se estende do México até partes da Eurásia e, até mesmo, para o continente sul-americano durante o inverno boreal.

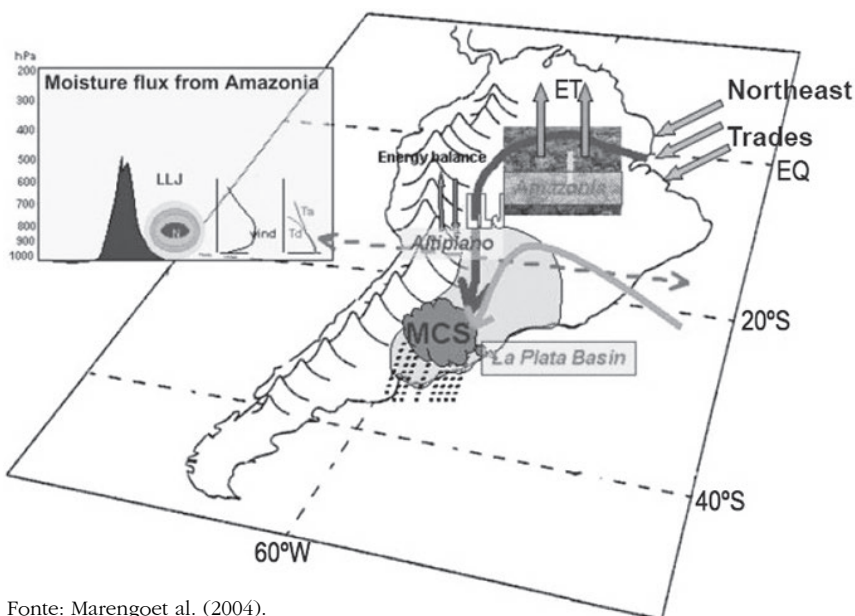
A bacia amazônica também se comporta como fonte de vapor d'água para outras regiões, fornecendo umidade predominantemente para o sudeste da América do Sul, região Central e Sudeste do Brasil, e bacia do Prata, principalmente nos meses de primavera e verão (MARENGO, 2005; DRUMOND *et al.*, 2008; ARRAUT e SATYAMURTY, 2009). A umidade fornecida pela evapotranspiração da Amazônia é transportada pelos ventos predominantes, e a precipitação decorrente da evapotranspiração aumenta de nordeste para sudoeste na bacia (ELTAHIR e BRAS, 1994). Parte da umidade é interceptada pela Cordilheira dos Andes e transportada através dos JBNs, a leste da cadeia de montanhas, para a bacia do Prata, sendo que 70% da precipitação nesta região é de origem terrestre, mostrando que a evapotranspiração com origem na Amazônia tem uma contribuição significativa sobre os recursos hídricos na bacia do Prata (VAN DER ENT *et al.*, 2010). Ademais, segundo Drumond *et al.* (2014), o transporte de umidade da Amazônia em direção ao sudeste da América do Sul aumenta durante os anos em que ocorre o fenômeno El Niño.

Os JBNs ocorrem com frequência em muitas partes do mundo. Estes ventos de máxima velocidade nos baixos níveis da atmosfera são importantes no que concerne aos fluxos verticais e horizontais de temperatura e umidade, e estão associados com o desenvolvimento e a evolução da convecção profunda. Uma vez que a convecção profunda é ativada, uma quantidade significativa de nebulosidade é produzida, sobretudo nos níveis superiores, sendo responsável por parte da precipitação sobre a América do Sul durante o verão. A relação entre JBNs e convecção profunda sugere que os JBNs exercem um importante papel na manutenção do clima regional.

Marengo *et al.* (2004) desenvolveram uma climatologia do JBN da América do Sul, Figura 3, a leste dos Andes, utilizando os campos de umidade e circulação provenientes das reanálises do NCEP-NCAR no período de 1950-2000 e observações de ar superior feitas sobre a Bolívia e

o Paraguai desde 1998. Os campos de circulação nos níveis alto e baixo da atmosfera foram derivados das médias sazonais e dos compostos do JBN durante as estações de verão e inverno. No que concerne às características da circulação regional, durante o verão, os compostos do JBN mostram aumento no transporte de umidade meridional em baixos níveis proveniente da América do Sul Equatorial, bem como um trem de ondas em altos níveis oriundo da parte oeste do Oceano Pacífico, propagando-se para o continente sul americano. A intensificação do JBN no verão austral associa-se ao estabelecimento de uma crista em altos níveis no sul do Brasil e um cavado sobre grande parte da Argentina. As anomalias de circulação nos níveis superior e inferior da atmosfera sugerem que a intensificação do JBN afeta a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), intensificando-a e, posteriormente, a penetração de frentes frias produz chuvas intensas na região de saída do jato, contribuindo para a formação dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM).

**Figura 3. Modelo conceitual do jato de baixos níveis (JBN) a leste dos Andes, que transporta umidade da Amazônia e do oceano Atlântico subtropical**



Fonte: Marengo et al. (2004).

Com relação à variabilidade temporal, o JBN da América do Sul parece ocorrer durante todo o ano, transportando massas de ar úmida tropical da Amazônia para o centro-sul do Brasil e norte da Argentina,

sobretudo no verão, conduzindo massa de ar tropical marítima da alta subtropical do Atlântico mais frequentemente no inverno. No verão, os JBNs são observados principalmente ao norte de 20°S, aproximadamente, enquanto ao sul eles parecem ocorrer durante o ano todo. Em escalas de tempo interanual, embora exista uma fraca tendência para fortes e mais frequentes episódios de JBN durante o verão em anos com águas superficiais aquecidas anormalmente no Pacífico Tropical, não é possível afirmar haver uma relação consistente entre a ocorrência de eventos de El Niño e o número e/ou intensidade de episódios de JBN (MARENGO *et al.*, 2004).

Grande parte do vapor d'água transportado meridionalmente através das latitudes médias ocorre por meio de corredores estreitos denominados Rios Atmosféricos (RAs). Em outras palavras, o conceito de RAs remete-se às principais vias do fluxo de umidade na atmosfera. Ao contrário dos rios de superfície, os rios atmosféricos ganham (perdem) água por meio da evaporação (precipitação) (ARRAUT *et al.*, 2012). Conforme salientam Gimeno *et al.* (2014), os RAs são caracterizados pelo alto conteúdo de vapor d'água e ventos fortes em baixos níveis (um JBN) e formam uma parte do extenso cinturão de correntes quentes dos ciclones extratropicais que desempenham um importante papel no transporte de calor sensível e latente em direção aos polos, para equilibrar a contribuição de outros componentes do ciclone que transportam relativamente ar frio e seco para o equador.

Arraut *et al.* (2012) conduziram um estudo observacional do transporte de umidade em larga escala sobre a América do Sul e sua relação com a precipitação subtropical. De acordo com os autores, os ventos de leste (alísios) sobre a Amazônia juntamente com o fluxo norte/noroeste para as regiões subtropicais, a leste dos Andes, constituem os RAs da América do Sul. Outrossim, os lagos atmosféricos são os setores da via de umidade onde o fluxo desacelera e se alarga devido à difluência, tornando-se mais profundo e com maior água precipitável. Este é o caso sobre a Amazônia, região a jusante da confluência dos ventos alísios. A descarga do RA nos subtropicais é comparável à do Rio Amazonas. As variações na quantidade de umidade proveniente da Amazônia têm um efeito importante na variabilidade da descarga. No entanto, as correlações entre o fluxo oriundo da Amazônia e a precipitação subtropical não são fortes.

O transporte de umidade das fontes oceânicas para os continentes estabelece a conexão entre a evaporação oceânica e a precipitação continental. Um estudo detalhado deste transporte pode fornecer uma melhor compreensão, tanto das mudanças observadas, quanto de alguma evidência física para sustentar os resultados de projeções do clima futuro (GIMENO *et al.*, 2012). Cenários de mudanças climáticas sugerem que a alta sensibilidade da pressão de saturação do vapor d'água à temperatura resultará em aumentos na evaporação e, portanto, na precipitação, conduzindo à



intensificação do ciclo hidrológico. Nesse sentido, Gimeno *et al.* (2013) investigaram duas questões chave referentes ao ramo atmosférico do ciclo hidrológico que ainda permanecem uma incógnita: (1) de que maneira as mudanças climáticas afetam o transporte de umidade? e, em especial, (2) de que modo as possíveis alterações na intensidade e localização das fontes poderiam afetar a distribuição da precipitação continental num clima em mudança?. Os autores utilizaram um conjunto de simulações de multi-modelos (*multimodel ensemble*) que permitiram delimitar as regiões oceânicas onde as mudanças climáticas provavelmente conduzirão ao aumento na evaporação (E) menos precipitação (P). Um modelo Lagrangiano foi utilizado para identificar quais regiões continentais serão afetadas pelas mudanças na precipitação ( $E - P < 0$ ) proveniente de cada fonte de umidade oceânica. De acordo com os resultados, durante o inverno boreal, grande parte da Europa, Ásia, Oriente Médio, América do Sul e África Meridional é afetada, porém a América do Norte surge como a região continental mais impactada. No inverno austral, as mudanças mais pronunciadas ocorrem, sobretudo, na América Central e do Norte.

Outra importante questão científica que necessita de melhor entendimento é o papel desempenhado pela Oscilação do Atlântico Norte e pelo El Niño-Oscilação Sul na variabilidade das regiões fonte de umidade, bem como uma avaliação detalhada da umidade transportada pelos JBNs e os RAs.

Embora a maior parte da umidade necessária para gerar as chuvas na bacia amazônica seja proveniente de fora da região, a contribuição da evapotranspiração local para a precipitação sobre a Amazônia – *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, produtividade e a ocorrência de eventos extremos, tais como enchentes e secas.

#### **4. RECICLAGEM DE PRECIPITAÇÃO**

A umidade que origina a 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 região. A reciclagem de precipitação é definida como a água que evapora da superfície continental dentro de um volume de controle e precipita no mesmo volume (BRUBAKER *et al.*, 1993), ou como o índice da razão da precipitação reciclada em relação à precipitação total, e tem por característica uma relação não linear entre a evapotranspiração, o transporte de umidade e a precipitação total em uma 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, qualquer alteração no uso e cobertura da terra e no clima, que modifique esses processos, pode afetar a quantidade de precipitação sobre a região, assim como a reciclagem.

Diversos trabalhos feitos anteriormente estimaram diferentes taxas de reciclagem de precipitação sobre uma mesma região. Isto ocorre, entre outros fatores, em decorrência do método utilizado para quantificar a reciclagem de precipitação e da fonte de dados utilizados e também da estação do ano considerada no estudo. Bosilovich e Schubert (2001), utilizando as reanálises do National Aeronautics and Space Administration Goddard Earth Observing System (GEOS-1) e dois métodos distintos baseados no balanço de umidade, calcularam em dois diferentes episódios de verão a taxa de reciclagem de precipitação sobre a região central dos Estados Unidos. Os autores encontraram uma taxa de reciclagem de 25% e 36%, com base nos métodos descritos por Brubaker *et al.* (1993) e Eltahir e Bras (1996), respectivamente.

Budyko (1974) desenvolveu um modelo unidimensional para estimar a contribuição da evapotranspiração local e umidade advectada na precipitação sobre grandes regiões. O autor definiu  $\beta$  como a razão entre a precipitação total e a precipitação originada pela umidade advectada. Calculando  $\beta$  para a Eurásia, o autor estimou que a contribuição local para a precipitação média anual sobre a região foi de apenas 11%.

Os estudos sobre o balanço de umidade na região amazônica foram inicialmente feitos com observações de precipitação, vazões dos rios e dados de algumas poucas estações de radiossondagem. Esses estudos mostraram que, em média, 50% da precipitação é reciclada e volta à atmosfera por meio da evapotranspiração (MOLION, 1975; MARQUES *et al.*, 1977). Outrossim, as pesquisas pioneiras consideraram que toda a evapotranspiração na bacia era transformada em precipitação na própria região.

No entanto, com base no estudo do balanço dos isótopos de  $O^{18}$  do vapor d'água que entra na região e nas águas do Rio Amazonas, Salati *et al.* (1979) estimaram que grande parte do vapor que entra na região pelos ventos alísios é transportada para fora da bacia e contribui para a geração de precipitação em outras regiões. De acordo com os autores, esse fluxo de umidade é da ordem de  $3 \text{ a } 5 \cdot 10^{12} \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$  e parte desse vapor d'água se dirige à região Centro-Sul do continente sul-americano.

Brubaker *et al.* (1993) adaptaram o modelo desenvolvido por Budyko (1974) em duas dimensões, com fluxos de umidade entrando e saindo em um volume de controle. Utilizando dez anos de dados observados de vento e umidade do Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) – National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), os autores determinaram a convergência de vapor d'água atmosférico e a fração da precipitação que tem origem local, sobre quatro regiões continentais: Eu-

rásia, África, América do Norte e Amazônia. De acordo com os resultados obtidos, os autores verificaram que a contribuição da evapotranspiração para a precipitação local varia sazonal e localmente. A reciclagem média anual determinada para as quatro regiões foi: Eurásia – 11%; América do Norte – 24%; e África Ocidental– 31%. Na Amazônia, os valores máximo (32%) e mínimo (14%) foram estimados nos meses de dezembro e junho, respectivamente.

Eltahir e Bras (1994) desenvolveram um modelo numérico bi-dimensional e utilizaram dados de reanálises (ECMWF e GFDL) para quantificar a reciclagem de precipitação na bacia amazônica. Os resultados revelaram uma reciclagem média anual da ordem de 25% e 35% de acordo com os dados do ECMWF e do GFDL, respectivamente. A distribuição espacial da reciclagem de precipitação apresentou diferenças significativas. A razão máxima de reciclagem foi identificada no setor sudoeste da bacia, com índices superiores a 50%.

Savenije (1995) utilizou um modelo unidimensional para calcular a reciclagem de precipitação em Sahel, África Ocidental, com base em dados observacionais de chuva e escoamento superficial no período de 1950-1990. Segundo o autor, a evapotranspiração é o mais importante mecanismo de retroalimentação, *feedback*, que sustenta as chuvas em bacias continentais, especialmente em regiões semiáridas. A reciclagem no Sahel é responsável por mais de 90% da precipitação na estação chuvosa; contudo, o valor encontrado é considerado superestimado, uma vez que a umidade no modelo proposto por Savenije (1995) não deixa a região através da atmosfera, mas apenas pelo escoamento superficial.

Trenberth (1999) utilizou o modelo proposto por Brubaker *et al.* (1993) e os dados do CMAP, NVAP e reanálises do NCEP/NCAR, no período de 1979-1995, para avaliar a distribuição espacial e sazonais na reciclagem de precipitação em escala global. Os resultados mostram que o valor da reciclagem de precipitação depende da escala de comprimento L considerada. Na Amazônia, a forte advecção de umidade domina o fornecimento de vapor d'água em grande parte da região, porém, o papel da evapotranspiração local é mais importante sobre o setor sul da bacia. Considerando o ciclo anual, cerca de 34% da precipitação é reciclada localmente. Entretanto, para a bacia do Mississipi, a reciclagem de precipitação estimada é da ordem de 21%.

Também utilizando as reanálises do NCEP/NCAR, a reciclagem de precipitação na Amazônia foi estimada por Costa e Foley (1999) em 20%; por Nóbrega *et al.* (2005) em 24%; por Silva (2009) em 27%; e por Satyamurty *et al.* (2013) em 30%. Um resumo desses estudos sugere que: (a) os fluxos de vapor d'água do Atlântico Equatorial associados aos ventos alísios são as principais fontes de umidade para a bacia amazônica; (b) admitindo-se que o Atlântico Norte seja a única fonte de umidade, é im-

possível explicar o padrão das chuvas na Amazônia, o que ressalta o papel da floresta na reciclagem de precipitação; e (c) a Amazônia é a principal fonte de umidade para o Brasil Central no período de setembro a fevereiro (MARENGO e NOBRE, 2009).

Costa e Foley (1999) analisaram a variabilidade dos componentes do balanço de umidade na bacia para o período de 1976-1996. Os autores observaram tendência de diminuição no transporte de vapor d'água, tanto o que entra, quanto o que sai, sobre a Amazônia. Essa tendência está associada com o "enfraquecimento" dos ventos alísios de sudeste, assim como do gradiente de pressão leste-oeste, e com o aquecimento da temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico equatorial sul. Enquanto o transporte atmosférico de vapor d'água através da Amazônia se reduziu, a reciclagem de precipitação no interior da bacia aumentou.

Nóbrega *et al.* (2005) analisaram os campos do fluxo de vapor d'água, evapotranspiração e precipitação no período entre 1978-1998 para investigar a variabilidade sazonal e interanual da reciclagem de precipitação sobre a América do Sul. Os resultados indicaram valores de reciclagem relativamente pequenos sobre a Amazônia e o Nordeste do Brasil e maiores na parte central da América do Sul, com núcleos de até 50% durante o verão. De acordo com os autores, os aspectos climatológicos da reciclagem de precipitação sobre a América do Sul mostram que a contribuição advectiva é mais importante para a precipitação sobre a Amazônia e o Nordeste do Brasil, ao passo que, na região Centro-Sul, a contribuição local tem importante papel na precipitação. A reciclagem média anual verificada sobre a bacia amazônica foi da ordem de 24%, com valor mínimo (21%) no bimestre junho-julho e máximo (27%) no mês de novembro.

Silva (2009) avaliou, segundo o modelo desenvolvido por Brubaker *et al.* (1993), a reciclagem e a precipitação de origem externa em seis regiões distintas da América do Sul para o período de 1979-2007. Os campos sazonais da precipitação de origem externa sobre a porção norte da América do Sul indicam contribuição dominante da umidade de leste, principalmente durante o inverno. Por outro lado, a maior parte da precipitação que ocorre sobre o Centro-Oeste e Sudeste do Brasil se deve à umidade proveniente do leste e do norte. Sobre o sul da América do Sul, a maior contribuição para a precipitação é proveniente da umidade vinda do oeste. Na Amazônia setentrional (central), verificou-se que 77% (73%) da precipitação é proveniente de umidade externa e 23% (27%), de origem local; na região Centro-Oeste, 36% da precipitação é de origem externa e 64% é gerada localmente; no Sudeste do Brasil, 30% da precipitação é de origem externa e cerca de 70% é local; e na bacia do Prata, aproximadamente 55% da precipitação é de origem externa e 45% é gerada localmente.

Van der Ent *et al.* (2010) mostraram quão importante é o papel da circulação geral da atmosfera, topografia e uso da terra nos padrões de

reciclagem de precipitação sobre os continentes e na distribuição mundial dos recursos hídricos. Os autores utilizaram os dados de reanálises do ECMWF (ERA-Interim, no período de 1998-2008) para quantificar os índices globais de reciclagem. De acordo com o estudo, em média, 40% da precipitação sobre os continentes tem origem na evapotranspiração da superfície terrestre; além disso, 57% de toda a evapotranspiração da superfície retorna como precipitação sobre os continentes. Os valores da reciclagem de precipitação estimada para o continente sul americano e, especificamente, na Amazônia foram de 36% e 28%, respectivamente.

Viana *et al.* (2010) utilizaram o modelo regional BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System) para avaliar os efeitos sobre a reciclagem de precipitação decorrentes do desflorestamento de grande escala na bacia amazônica. As condições iniciais e de contorno foram fornecidas pelo Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA – CPTEC/INPE). Para estimar a reciclagem de precipitação, os autores se basearam no método desenvolvido por Brubaker *et al.* (1993). Os resultados revelaram heterogeneidade na reciclagem de precipitação, com valores mais intensos no centro-sul da bacia, principalmente no período chuvoso. Na estação seca (chuvosa), a reciclagem de precipitação foi da ordem de 14,3% (25%), sendo que a redução na evapotranspiração e o aumento no transporte de umidade contribuíram, significativamente, para a diminuição da reciclagem no período de estiagem.

Com base nos resultados dos estudos discutidos, estima-se que a reciclagem de precipitação na bacia amazônica seja da ordem de 20-35%. Tanto o desflorestamento, quanto as mudanças do clima global, devidas ao aumento das emissões antropogênicas dos gases de efeito estufa, podem afetar o funcionamento dos ecossistemas amazônicos, reduzindo sua capacidade de capturar o carbono da atmosfera, aumentando a temperatura na superfície, reduzindo a umidade do solo, modificando o ciclo hidrológico regional e, conseqüentemente, a reciclagem. Embora os estudos sobre reciclagem de precipitação tenham produzido novos conhecimentos acerca da interação entre os processos de superfície e o ciclo hidrológico, os efeitos das mudanças climáticas globais nesse mecanismo ainda não estão completamente compreendidos.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho apresentou uma perspectiva histórica da evolução do conhecimento e uma visão crítica do estado da arte atual sobre a reciclagem de precipitação. Foram retratadas as características do clima da Amazônia no que diz respeito às principais fontes de umidade para a precipitação na região, bem como a circulação atmosférica e o transporte de vapor d'água sobre a América do Sul. Foi apresentada uma revisão dos estudos observacionais e de modelagem numérica com o objetivo de quantificar e avaliar

a reciclagem de precipitação na Amazônia e em outras regiões do planeta.

O transporte de umidade das fontes oceânicas para os continentes estabelece a conexão entre a evaporação oceânica e a precipitação continental. Nesse sentido, o fluxo de umidade do Atlântico Equatorial, associado aos ventos alísios, é a principal fonte de umidade para a Amazônia. O transporte de vapor d'água que alimenta a bacia ocorre de leste para oeste durante todo o ano. A Amazônia também se caracteriza como uma importante fonte de umidade para o sudeste da América do Sul, região Central e Sudeste do Brasil e bacia do Prata, principalmente durante a primavera e o verão. O vapor d'água fornecido pela evapotranspiração da floresta é transportado pelos ventos predominantes, e a precipitação decorrente da evapotranspiração aumenta de nordeste para sudoeste na bacia. Parte da umidade é interceptada pelos Andes e transportada através dos JBNs para a bacia do Prata, sendo 70% da precipitação nesta região de origem terrestre.

A quantificação do 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. Os aspectos climatológicos da reciclagem de precipitação sobre a América do Sul mostram que a contribuição advectiva é mais importante para a precipitação sobre a Amazônia e o Nordeste do Brasil, ao passo que, na região Centro-Sul, a contribuição local tem importante papel na precipitação. Com base nos resultados dos estudos discutidos, estima-se que a reciclagem de precipitação na bacia amazônica seja da ordem de 20-35%. A advecção de umidade domina o fornecimento de vapor d'água em grande parte da região, entretanto, o papel da evapotranspiração local na reciclagem é mais importante no setor sul da bacia.

A Amazônia apresenta vulnerabilidade às variabilidades e mudanças do sistema climático. O risco dos impactos no ciclo hidrológico regional, na reciclagem de precipitação e, conseqüentemente, sobre os ecossistemas amazônicos é potencializado quando alterações no uso da terra em escala regional são acompanhadas por mudanças no clima em escala global. Embora os estudos apresentados tenham quantificado a distribuição da reciclagem de precipitação sobre os continentes, os efeitos das mudanças climáticas globais nesse mecanismo ainda não estão completamente compreendidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRAUT, J.R.; SATYAMURTY, P. Precipitation and water vapor transport in the Southern Hemisphere with emphasis on the South American region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.48, n.9, p.1902-1912, 2009.
- ARRAUT, J.R.; NOBRE, C.; BARBOSA, H.M.J.; OBREGON, G.;

- MARENGO, J.A. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. *Journal of Climate*, v.25, n.2, p.543-556, 2012.
- ARTAXO, P.; GATTI, L.V.; LEAL, A.M.C.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.R.; LARA, L.L.; PAULIQUEVIS, T.M.; PROCÓPIO, A.S.; RIZZO, L.V. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazonica*, v.35, n.2, p.185-196, 2005.
- BOSILOVICH, M.G.; SCHUBERT, S.D. Precipitation Recycling over the Central United States Diagnosed from the GEOS-1 Data Assimilation System. *Journal of Hydrometeorology*, v.2, n.1, p.26-35, 2001.
- BRUBAKER, K.L.; ENTEKHABI, D.; EAGLESON, P.S. Estimation of Continental Precipitation Recycling. *Journal of Climate*, v.6, n.6, p.1077-1089, 1993.
- BUDYKO, M.I. *Climate and Life*. New York, USA: Academic Press, 1974. 508p.
- COHEN, J.C.P.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C.A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. *Monthly Weather Review*, v.123, n.11, p.3163-3174, 1995.
- COSTA, M.H.; FOLEY, J.A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, v.104, n.D12, p.14189-14198, 1999.
- DOYLE, M.E.; BARROS, V.R. Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical South America and related sea surface temperature anomalies in the South Atlantic. *Journal of Climate*, v.15, p.3394-3410, 2002.
- DRUMOND, A.; MARENGO, J.A.; AMBRIZZI, T.; NIETO, R.; MOREIRA, L.; GIMENO, L. The role of Amazon Basin moisture on the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, v.11, n.1, p.1023-1046, 2014.
- DRUMOND, A.; NIETO, R.; GIMENO, L.; AMBRIZZI, T. A Lagrangian identification of major sources of moisture over Central Brazil and La Plata Basin. *Journal of Geophysical Research*, v.113, n.D14, p.1-9, 2008.
- ELTAHIR, E.A.B.; BRAS, R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.120, n.518, p.861-880, 1994.
- ELTAHIR, E.A.B.; BRAS, R.L. Precipitation Recycling. *Reviews of Geophysics*, v.34, n.3, p.367-379, 1996.
- FEARNSIDE, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. *Conservation Biology*, v.19, n.3, p.680-688, 2005.

- FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C. Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America. *Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v.5, n.6, p.36-48, 1990.
- FISCH, G.; MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Uma revisão sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonica*, v.28, n.2, p.101-126, 1998.
- GIMENO, L.; NIETO, R.; DRUMOND, A.; CASTILLO, R.; TRIGO, R. Influence of the intensification of the major oceanic moisture sources on continental precipitation. *Geophysical Research Letters*, v.40, n.7, p.1443-1450, 2013.
- GIMENO, L.; NIETO, R.; VÁZQUEZ, M.; LAVERS, D.A. Atmospheric rivers: a mini-review. *Frontiers of Earth Science*, v.2, p.1-6, 2014.
- GIMENO, L.; STOHL, A.; TRIGO, R.M.; DOMINGUEZ, F.; YOSHIMURA, K.; YU, L.; DRUMOND, A.; DURÁN-QUESADA, A.M.; NIETO, R. Oceanic and Terrestrial Sources of Continental Precipitation. *Reviews of Geophysics*, v.50, n.4, p.1-41, 2012.
- MARENGO, J.A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, v.78, n.1-3, p.79-96, 2004.
- 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: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DA SILVA, M.G.A.J.; SILVA DIAS, M.A.F. (Orgs.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009. p.197-212.
- 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, n.12, 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, n.3, p.355-362, 1977.
- MOLION, L.C.B. *A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects*. 1975. Ph.D. Thesis – University of Wisconsin, Madison, USA, 1975.
- NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A.; ARTAXO, P. Understanding the Climate of Amazonia: Progress From LBA. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Orgs.). *Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser*, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, 2009a. p.145-147.



- 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. (Orgs.). *Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser.* vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books, 2009b. 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, n.2, p.253-262, 2005.
- SALATI, E.; DALL'OLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J.R. Recycling of Water in the Amazon Basin: An Isotopic Study. *Water Resources Research*, v.15, n.5, p.1250-1258, 1979.
- 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.
- SAVENIJE, H.H.G. New definitions for moisture recycling and the relation with land-use changes in the Sahel. *Journal of Hydrology*, v.167, n.1-4, p.57-78, 1995.
- SILVA, A.E. *Variabilidade da Circulação e Transporte de Umidade no Regime de Monção da América do Sul*. 2009. 137f. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- TRENBERTH, K.E. Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. *Journal of Climate*, v.12, n.5, 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 Resources Research*, v.46, n.9, p.1-12, 2010.
- VERA, C.; BAEZ, J.; DOUGLAS, M.; EMANUEL, C.B.; ORSINI, J.A.M.; MEITIN, J.; NICOLINI, M.; NOGUES-PAEGLES, J.; PAEGLE, J.; PENALBA, O.; SALIO, P.; SAULO, C.; SILVA DIAS, M.A.F.; SILVA DIAS, P.; ZIPSER, E. The South American Low Level Jet Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.87, n.1, p.63-77, 2006.
- VIANA, L.P.; CORREIA, F.W.S.; FREITAS, S.R. Modelagem do impacto das mudanças no uso da terra na reciclagem de água na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XVI, 2010, Belém-PA. *Anais...* Belém: UFPA, 2010. p. 1-5.

*Recebido em: 19/09/2015*

*Aceito em: 22/11/2015*